

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 9. № 6

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

**САНКТ-ПЕТЕРБУРГ
2017**

Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — СПб.: ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова, 2017. — Т. 9. — № 6. — 212 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, 2017

СОДЕРЖАНИЕ

ЭКСПЛУАТАЦИЯ ВОДНОГО ТРАНСПОРТА, СУДОВОЖДЕНИЕ ... 1149

- Дмитриев В. И., Каретников В. В.* Методы обеспечения безопасности мореплавания при внедрении беспилотных технологий 1149
- Дерябин В. В.* Оценка погрешности метода счисления широты судна 1159
- Бояринов А. М., Еришов А. А., Пылаев С. М.* Анализ применимости формул расчета ветро-волновых потерь скорости хода морских судов 1168
- Минаев О. П.* Повышение эксплуатационной безопасности и надежности портовых гидротехнических сооружений при разжижении грунтов оснований новым взрывным способом уплотнения 1175
- Соляков О. В., Потемкин А. А., Першин Н. В.* Оптимизация режимов управления движением речных судов 1186
- Никитин Е. В.* Анализ устойчивости двухзвенных систем подвешивания с эластичными стропами при погрузке / выгрузке крупногабаритных и тяжеловесных грузов 1197
- Изотов О. А., Гультаев А. В.* Расчет количества насыпных контейнеров при организации перевалки навалочных грузов на неспециализированном причале 1209

ВОДНЫЕ ПУТИ СООБЩЕНИЯ И ГИДРОГРАФИЯ 1217

- Кузнецов А. Л., Попов Г. Б.* Влияние начертания причальной линии на показатели эффективности работы морского порта 1217
- Гапеев А. М., Моргунов К. П., Карачева М. К.* Система наполнения камеры низконапорного судоходного шлюза из-под сегментных подъемно-опускных ворот 1227

СУДОСТРОЕНИЕ И СУДОРЕМОНТ 1234

- Веселков В. В., Лобанов Н. В., Васильев А. В.* Исследование поведения покрытий на нержавеющей стали в условиях высоких контактных нагрузок 1234
- Цветков Ю. Н., Власов М. Ю., Дехтярь Л. И.* Природа вязкостно-температурной зависимости смазочных масел 1242
- Белецкий Е. Н.* Моделирование процесса навивки оболочек композиционными материалами 1252
- Шарифов З. З., Алиев Ч. М., Кулиев А. М.* Исследование влияния шероховатости поверхности на износ поверхностного слоя деталей судовых машин и механизмов, обработанных различными методами 1262
- Глухих В. М., Петров В. М., Худаев Е. В.* Усиление элементов конструкций наклейкой композиционных материалов в сжатой и растянутой зоне 1273
- Васильев К. А.* Моделирование и испытание отдельных элементов системы аспирации и вентиляции, используемой при механической обработке композиционных судостроительных материалов 1282

Том 9. № 6

2017

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.
Е. А. Лаврентьева, д.э.н.
А. Ю. Ластовцев, к.т.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. 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.

**СУДОВЫЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ УСТАНОВКИ,
СИСТЕМЫ И УСТРОЙСТВА..... 1291**

Пунда А. С., Гурьев Ю. Г. Использование регулируемого турбонаддува для оптимизации рабочих процессов главных судовых двигателей при длительной работе на малых мощностях 1291

Гаврилов В. В., Мащенко В. Ю., Захаров В. И. Согласование конструктивных и регулировочных параметров дизеля на основе анализа внутрицилиндровых процессов..... 1300

ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ КОМПЛЕКСЫ И СИСТЕМЫ..... 1310

Толокнова О. М., Саушев А. В., Шошмин В. А. Анализ связи и прогнозирование активных и реактивных электрических нагрузок грузоподъемных машин 1310

Кузнецов С. Е., Кудрявцев Ю. В., Виноградов А. А. Оценка качества электроэнергии на судне в процессе эксплуатации 1320

**ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И АВТОМАТИЗАЦИЯ
НА ТРАНСПОРТЕ 1330**

Айзинов С. Д., Сазонов А. Е., Солодовниченко М. Б. Разработка нечеткой модели выбора вида профессиональной деятельности выпускниками вуза 1330

Ханова А. А., Райкова Е. Ф., Бондарева И. О. Методологические основы и программное обеспечение системы стратегического управления грузовым портом 1338

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 1149

Dmitriev V. I., Karetnikov V. V. Methods of ensuring the safety of navigation
when implement unmanned technology 1149

Deryabin V. V. Assessment of a method error of dead reckoning of a vessel's
latitude..... 1159

Boyarinov A. M., Ershov A. A., Pylayev S. M. Analysis of the applicability
of the formulas the calculation of the loss of ships speed due to wind
and waves..... 1168

Minaev O. P. Improvement of operational safety and reliability of port
hydrotechnical structures to the liquefaction of soil bases by a new explosive
sealing method 1175

Soliakov O. V., Potemkin A. A., Pershin N. V. Optimization of the motion
river vessels regimes control..... 1186

Nikitin Y. V. Stability analysis of two-chain suspension arrangement with
elastic slings for large-scale and heavy lift cargo operations..... 1197

Izotov O. A., Gulyaev A. V. The calculation of the number of bulk containers
in the organization of transshipment of bulk cargoes at specialized berth 1209

WATERWAYS AND HYDROGRAPHY 1217

Kuznetsov A. L., Popov G. B. The influence of the berth line configuration
on the seaport performance 1217

Gapeev A. M., Morgunov K. P., Karacheva M. K. Filling system
of low-shipping shipping camera chamber from segment lifting-gate doors 1227

SHIPBUILDING AND SHIP REPAIR 1234

Veselkov V. V., Lobanov N. V., Vasilev A. V. Investigation of behaviour of covers
on stainless materials in conditions of high contact loads 1234

Tsvetkov Yu. N., Vlasov M. Yu., Dekhtyr L. I. Nature of viscosity-temperature
dependence of lubricating oils 1242

Beletskii E. N. Modeling of the process of winding shells of composite
materials 1252

Sharifov Z. Z., Aliyev C. M., Guliyev A. M. Research of surface roughness
influence on ware resistant characteristics of ship machinery and mechanisms
parts' surface layer processed with different methods 1262

Gluhih V. N., Petrov V. M., Khudaev E. V. Strengthening of structural elements
sticker of composite materials at compressed and stretched area..... 1273

Vasilev K. A. Simulation and testing of individual elements of the aspiration
system and ventilation used during mechanical treatment of composite
shipbuilding materials..... 1282

SHIP POWER PLANTS, SYSTEMS AND DEVICES..... 1291

Punda A.S., Gurev Y.G. Application of adjustable turbocharging for
optimization of working processes of main ships engines during
the long-term operation at the small power modes..... 1291

Gavrilov V.V., Mashchenko V.Y., Zakharov V.I. Harmonization of the
constructive and controllable parameters of the diesel engine on the basis
of the analysis of the processes in the cylinder..... 1300

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
Ye. A. Lavrentyeva,
doctor of economic Sciences
A. Yu. Lastovtsev,
candidate of technical 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. 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..... 1310

Toloknova O.M., Saushev A.V., Shoshmin V.A. Analysis of the connection
of active and reactive electrical loads of load-lifting machines..... 1310
Kuznetsov S.E., Kudryavtsev Yu.V., Vinogradov A.A. Estimation of electricity
quality at the vessel in the operation process..... 1320

INFORMATION TECHNOLOGY AND AUTOMATION IN TRANSPORT..... 1330

Aysinov S.D., Sazonov A.E., Solodovnicheko M.B. Fuzzy model of the type
of professional activity by university graduates choice..... 1330
Khanova A.A., Raykova E.F., Bondareva I.O. Methodological bases
and software of system of strategic management by cargo port..... 1338

ЭКСПЛУАТАЦИЯ ВОДНОГО ТРАНСПОРТА, СУДОВОЖДЕНИЕ

DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-6-1149-1158

METHODS OF ENSURING THE SAFETY OF NAVIGATION WHEN IMPLEMENT UNMANNED TECHNOLOGY

V. I. Dmitriev, V. V. Karetnikov

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

The world experience in creating ships based on unmanned technology is considered, constructive technologies for the formation of navigational systems of unmanned vessels are described that allow the ship to be operated both remotely by the operator and autonomously, without human participation. As the most striking examples, the basic schemes for the construction of navigational complexes for unmanned ships under construction in the framework of such projects as "Maritime Unmanned Navigation through Intelligence in Networks" (MUNIN) and Advanced Autonomous Waterborne Applications (AAWA) are presented and considered. Particular attention is paid to the features of the implementation of the autonomous control mode of an unmanned ship and the remote-control mode. Advantages and disadvantages of the use of unembarrassed vessels in the practice of global navigation are discussed to ensure the carriage of goods by sea. The main international and national regulatory frameworks are analyzed to identify shortcomings and inconsistencies that impede the introduction and operation of unmanned ships in the coastal waters and the world's oceans. Particular attention is paid to the regulatory framework developed under the auspices of the International Maritime Organization (IMO). The aspects that allow to draw unambiguous conclusions about the changes in the traditional operations of navigational vessels currently performed by navigators when unmanned technologies are deployed are outlined. The procedures for planning the flight, receiving and delivering the cargo, providing assistance to people in distress for their execution on board unmanned and conventional vessels are considered. The concept of the usual marine practice from the point of view of unaccounted navigation in the waters of the world ocean is disclosed. The final part of the article clearly articulates the problems of the regulatory framework that hamper the large-scale introduction of unmanned vessels in maritime and inland waterway transport.

Keywords: unmanned vessels, navigation safety, good Maritime practice, voyage planning, assisting people in distress.

For citation:

Dmitriev, Vladimir I., and Vladimir V. Karetnikov. "Methods of ensuring the safety of navigation when implement unmanned technology." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova* 9.6 (2017): 1149–1158. DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-6-1149-1158.

УДК 656.61.052

МЕТОДЫ ОБЕСПЕЧЕНИЯ БЕЗОПАСНОСТИ МОРЕПЛАВАНИЯ ПРИ ВНЕДРЕНИИ БЕСПИЛОТНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

В. И. Дмитриев, В. В. Каретников

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

Рассматривается мировой опыт создания судов, основанных на беспилотной технологии, описываются конструктивные технологии по формированию навигационных систем беспилотных судов, позволяющих осуществлять управление судном как удаленно оператором, так и автономно, без участия человека. В качестве наиболее ярких примеров приведены и рассмотрены принципиальные схемы построения навигационных комплексов беспилотных судов, строящихся в рамках таких проектов, как «Maritime Unmanned

Navigation through Intelligence in Networks» (MUNIN) и Advanced Autonomous Waterborne Applications (AAWA). Особое внимание в работе уделено особенностям реализации автономного режима управления беспилотным судном и режима удаленного управления. Обсуждаются преимущества и недостатки применения безэкипажных судов в практике мирового судоходства для обеспечения перевозки грузов морем. Анализируются основные международная и национальная нормативные базы с целью выявления недостатков и несоответствий, препятствующих внедрению и эксплуатации беспилотных судов в прибрежных водах и Мировом океане. Особое внимание уделено нормативной базе, разработанной под эгидой Международной морской организации (ИМО). Расставлены аспекты, позволяющие сделать однозначные выводы об изменениях традиционных операций, выполняемых в настоящее время штурманским составом морских судов при внедрении беспилотных технологий. Рассмотрены процедуры планирования рейса, приёма и сдачи груза, оказания помощи людям, терпящим бедствие, на предмет их выполнения на борту беспилотных и обычных судов. Раскрыто понятие «обычная морская практика» с точки зрения безэкипажного судоходства в водах Мирового океана. В заключительной части статьи четко сформулированы проблемы нормативной базы, препятствующие крупномасштабному внедрению беспилотных судов на морском и внутреннем водном транспорте.

Ключевые слова: беспилотные суда, обеспечение безопасности судоходства, хорошая морская практика, планирование рейса, оказание помощи людям, терпящим бедствие.

Для цитирования:

Дмитриев В. И. Методы обеспечения безопасности мореплавания при внедрении беспилотных технологий / В. И. Дмитриев, В. В. Каретников // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2017. — Т. 9. — № 6. — С. 1149–1158. DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-6-1149-1158.

Введение (Introduction)

В большинстве случаев аварийных происшествий прослеживается совокупность причин и обстоятельств, которые обуславливают конкретное аварийное происшествие. К таким причинам относятся:

- техническое состояние судна и водного пути;
- организационно-технологические мероприятия, связанные с судоходством;
- воздействие на судно окружающей среды, а также состояние груза и его влияние на судно;
- влияние человеческого фактора (человеческого элемента).

Полное устранение этих причин, к сожалению, не представляется возможным. Однако на практике вполне допустимо оказывать влияние на аварийность с помощью всевозможных мер технического, организационного, эксплуатационного, правового характера, соответствующего надзора и контроля и достичь ее относительного снижения на определенный период времени.

В последнее время в мировой и отечественной морской прессе ставится вопрос о том, что в скором времени беспилотные грузовые суда смогут самостоятельно осуществлять перевозки по морю, не имея при этом экипажа на борту. Причина подобного интереса достаточно проста — считается, что такие корабли будут безопаснее, эффективнее и экономичнее в обслуживании [1], [2]. Аргументация сводится к следующему. Военные беспилотные летательные аппараты уже в течение длительного времени осуществляют перелеты и используются при проведении гражданских операций. Беспилотные автомобили при определенных условиях могут осуществлять тысячекилометровые пробеги. В связи с этим возникает вопрос: *почему бы не создать автономные суда, которые будут функционировать без экипажа на борту.* И в самом деле, специалисты морской промышленности все чаще стали задумываться о необходимости запуска полностью автономных судов.

Методы и материалы (Methods and Materials)

Евросоюз во главе с немецкими специалистами участвует в разработке новой системы автономного управления судами, позволяющей грузовым судам совершать океанские переходы без экипажа на борту. Указанный проект получил название «Maritime Unmanned Navigation through Intelligence in Networks» (MUNIN) [3]. Принцип построения MUNIN приведен на рис. 1. Проект MUNIN не предусматривает автоматизированного плавания в прибрежных водах, где интенсив-

ность судоходства сравнительно велика. Предполагается, что из порта отправления в открытое море судно будет выводить экипаж, который затем вернется на берег. Далее судно, управляемое бортовым компьютером под контролем оператора на суше, продолжит свой путь через океан, а у порта назначения на борт снова взойдет экипаж и примет управление на себя. Конечно, практическая реализация такой схемы — дело далекого будущего по причинам, в том числе правового характера, — ведь на сегодняшний день любое судно, находящееся в открытом море без экипажа на борту, считается бесхозным и его может присвоить себе любой, кто поднимется на борт.



Рис. 1. Принцип построения MUNIN

В компании «Rolls-Royce» по проекту передовых автономных водных технологий Advanced Autonomous Waterborne Applications (AAWA), реализуемому в Финляндии, предполагают, что первыми полностью автономными судами будут либо портовые буксиры, либо паромы, перевозящие машины с одного берега реки на другой. Разработчики планируют завершить проект к концу 2017 г. [4]. В проекте разработана десятиуровневая шкала, которая описывает уровни автоматизации судна. На первом уровне человек решает все задачи самостоятельно, а на последнем — все управление осуществляется системой, без участия человека. Для управления такими судами предполагается использовать спутниковые иноземные системы радиосвязи.

В режиме проработки рейса для каждого участка пути будет определено, в каком режиме эксплуатируется судно — это может быть полностью автономный режим или режим удаленного управления. При этом необходимо отметить, что разработчиками предусмотрена возможность автоматического перехода из автономного режима в режим дистанционного управления в случае появления задач, решение которых должно осуществляться с участием человека. В проекте предполагается, что швартовка судна будет осуществляться в автоматическом режиме с использованием специально разработанной автоматической системы швартовки. При маневрировании судна в стесненных условиях управление судном может полностью осуществляться оператором.

Навигационный комплекс AAWA строится на основе системы динамического позиционирования (ДП), разработанной компанией «Rolls-Royce», которая получила название *автоматическая навигационная система* (АНС) — рис. 2, включающая следующие блоки: *СП* — блок ситуационного предупреждения; *ПС* — блок предупреждения столкновений; *ПП* — блок проработки маршрута; *МСС* — блок мониторинга состояния судна.

Исследователи в «Safer Smarter Greener» (DNV GL) — Международной организации по сертификации судов, в настоящее время разрабатывают возможность запуска беспилотных судов на батареях вдоль берегов Норвегии [5]. Норвежское морское ведомство и Норвежская береговая администрация уже подписали разрешение на проведение морских испытаний во фьорде Тронхеймс (это первое место в мире, специально отведенное под испытания автономных судов).

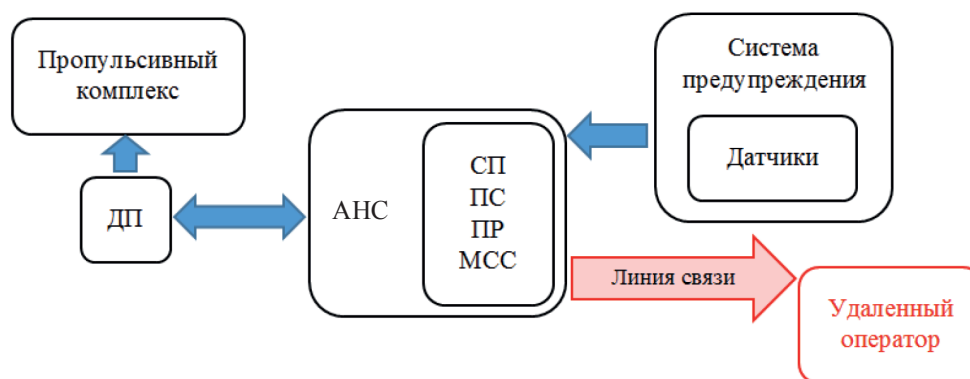


Рис. 2. Принципиальная схема АНС

Японские кораблестроительные и грузовые компании совместно с правительством приступили к разработке технологии автономной навигации для морских судов. Первые беспилотные суда должны появиться уже через 8 лет. С их помощью предприятия надеются повысить безопасность морских перевозок и отвоевать 1/3 мирового кораблестроительного рынка [6].

Китайская администрация морской безопасности совместно с Уханьским технологическим университетом запустили проект по разработке беспилотных многофункциональных судов. Их цель — выяснить, как можно использовать автономные корабли в экономическом и военном китайских секторах. Предполагается, что экипаж на беспилотных судах заменят компьютеры, соединённые с системой сенсоров, которые будут постоянно анализировать ситуацию на судне и за его пределами.

По мнению мировой научной общественности, полностью роботизированные корабли появятся не ранее середины 2030-х гг., причём поначалу они будут использоваться для доставки навалочных грузов вроде руды и зерна. Ценные товары, топливо и опасные вещества по-прежнему будет сопровождать команда.

Обсуждение (Discussion)

Морская отрасль заинтересована в автономных судах ввиду следующих основных причин: безопасность судоходства, стоимость эксплуатации, эффективность перевозок груза, снижение риска пиратства, отсутствие экипажа.

Первая причина — *безопасность*. Большинство аварийных случаев в море являются результатом человеческой ошибки, так же, как и в случаях с другими видами транспорта (в частности, с самолетами и автомобилями). Согласно докладу мюнхенской страховой компании «Allianz» [7], в 2016 г. от 75 до 96 % аварий на воде явились результатом человеческих ошибок, которые, в свою очередь, были обусловлены усталостью. Поэтому, если людей, управляющих судном, заменить высокотехнологичными сенсорами и компьютерными системами, то автономные суда должны теоретически стать более безопасными.

Вторая причина — *цена*. Сейчас все сложнее становится собрать опытную команду, которая готова находиться месяцами в море. Более того, согласно данным консалтинговой компании «Moore Stephens LLP» [8], около 44 % общих эксплуатационных расходов при эксплуатации среднестатистического судна, как правило, идет на обеспечение экипажа. Возникает дилемма: *иметь 20 членов экипажа на борту или пять в диспетчерской на берегу?*

Третья причина — *эффективность перевозок груза*. Отказ от экипажа устраняет необходимость наличия капитанского мостика, надстроек, жилых помещений для экипажа, ряда общесудовых систем, запасов пресной воды и т. д. В связи с этим дистанционно управляемые суда при схожих размерах будут примерно на 5 % легче судов с экипажем, станут потреблять меньше топлива и благодаря освобождению дополнительного пространства смогут перевозить больше грузов.

Четвёртая причина — *существенное снижение риска пиратства*. Беспилотные суда можно строить так, чтобы их было крайне сложно взять на abordаж. И даже если пираты смогут попасть на борт, доступ к системам управления также может быть перекрыт. Электроника может просто заблокировать судно или заставить его ходить кругами. Собственно, на дистанционно управляемых судах без людей, за которых можно потребовать выкуп, проблема пиратских нападений станет менее актуальной.

Пятая причина — *решение проблемы недостатка персонала с достаточным уровнем навыков*. В настоящее время суда становятся все сложнее и совершеннее и чтобы их использовать, необходим специально обученный персонал. Одновременно с этим морское дело становится все менее привлекательным в качестве карьеры. Автономные или дистанционно управляемые суда создадут новые рабочие места с высокими требованиями к образованию и навыкам в портах и центрах управления. Такая карьера может быть куда более привлекательной для молодежи.

Однако уже сейчас многие морские компании, страховые агентства, профсоюзы и регуляторные органы сомневаются в экономичности, безопасности и эффективности беспилотных судов. В настоящее время в международных правилах отсутствуют положения о возможности использования подобных плавсредств, их страховки, а также об их действиях в случае аварии. Именно это обстоятельство может способствовать закрытию проекта еще на начальной стадии.

Секретарь Международной ассоциации классификационных обществ Дерек Ходжсон (Derek Hodgson) отметил, что на данный момент не разработаны единые правила сертификации беспилотных судов. В настоящее время беспилотные суда, в соответствии с международными конвенциями, являются незаконными. Как заявил Саймон Беннетт (Simon Bennett) — представитель Международной палаты судоходства, данный вопрос сейчас серьезно не рассматривается. Кроме того, Международная морская организация (ИМО) не получала каких-либо предложений по поводу дистанционно управляемых судов. До тех пор, пока беспилотные суда не будут соответствовать правилам ИМО, они будут рассматриваться как немореходные, не подлежащие страхованию. Проект Advanced Autonomous Waterborne Applications Initiative (AAWA — передовая инициатива приложений для автономного передвижения по воде) совместно с двумя группами ученых в Европе исследуют возможность внесения в правила ИМО изменений для решения указанной проблемы.

Первая группа ученых базируется в Швеции — SARUMS («Безопасность и правила для европейских беспилотных морских систем»), вторая группа ученых находится в Великобритании — «Группа по разработке законодательства для морских автономных систем». Цель их деятельности заключается в разработке новой редакции Международной конвенции по охране человеческой жизни на море, в которой должны быть учтены последние технологические достижения в области беспилотного судоходства.

Несмотря на всю важность и революционность проекта «Rolls-Royce» по созданию беспилотных судов, споры вокруг их будущего ведутся, прежде всего, теоретиками. Судовладельцы пока не очень заинтересованы в столь кардинальных изменениях своей деятельности. Пока что ни один из членов Балтийского и международного морского совета, контролирующего около 65,5 % мирового флота, не поднял вопрос о практическом использовании беспилотных судов. Необходимо также отметить, что для реализации беспилотного судоходства потребуется пересмотреть используемую в практике обеспечения безопасности судоходства национальную и международную нормативно-правовую базу: МК СОЛАС-74 [9], ПДНВ-78 [10], МППСС-72 [11] и др.

Рассмотрим основные факторы, на которые следует обратить внимание при эксплуатации беспилотных судов.

Планирование рейса. Согласно требованиям правила 34 «Безопасность судовождения и предотвращение опасных ситуаций» гл. V Международной конвенции по охране человеческой жизни на море 1974 г. (СОЛАС-74) и ч. 2 разд. A-VIII/2 Международного кодекса ПДНВ-78 («Планирование рейса»), до выхода в море капитан должен обеспечить планирование намеченного рейса, используя соответствующие морские навигационные карты и пособия для плавания, принимая во внимание требования, Резолюции ИМО А.893(21) от 25 ноября 1999 г., содержащиеся в Руко-

водстве по планированию рейса [12]. Согласно этим требованиям, предстоящий рейс должен быть запланирован для всех судов заранее от причала до причала, включая районы, где требуется присутствие на борту лоцмана, принимая во внимание всю имеющую к этому отношение информацию, а любой проложенный курс должен быть проверен до начала рейса.

Если в ходе рейса было принято решение об изменении следующего порта захода или необходимо существенно отклониться от запланированного пути по другим причинам, измененный путь должен прорабатываться заранее, до того момента, как он будет существенно изменен. Однако в этом случае возникает вопрос: *кто должен осуществлять эти функции для каждого конкретного судна и рейса?*

Приём и сдача груза. В настоящее время грузовой помощник капитана на судне ведает приемом и сдачей груза, его размещением, хранением, сепарированием, укладкой, креплением, перевозкой, выгрузкой, сдачей и отвечает за оформление документов. Не будем подробно конкретизировать его функции, но отметим, что сюда входит составление Грузового плана с учетом конструкции судна, специфики и свойств груза, допустимой осадки и требуемого дифферента, обеспечения остойчивости и общей и местной прочности судна, последовательности портов выгрузки; обеспечение выполнения правил пожарной безопасности при погрузке, размещении, перевозке и выгрузке грузов, в особенности легковоспламеняющихся и взрывоопасных грузов, а также правил перевозки ядовитых и других опасных веществ. Необходимо следить на наливных судах за техническим состоянием приемного грузового устройства, чистотой грузовых танков, не допуская обводнения, смешения, перелива и разлива грузов, непосредственно руководить балластировкой и дебалластировкой судна; следить за санитарным состоянием трюмов и поддержанием температурного режима в рефрижераторных трюмах и грузовых помещениях; систематически проверять состояние льял, колодцев, горловин, приемных сеток, систем вентиляции и других устройств грузовых помещений обязательно перед приемкой груза с записью в судовом журнале; следить за обеспечением технически исправного состояния судовых средств механизации погрузочно-разгрузочных работ и внутритрюмной механизации, но при этом возникает вопрос: *кто будет выполнять вышеперечисленные функции для конкретного беспилотного судна?*

Обычная морская практика. Наиболее типичными видами международно-правовых стандартов безопасности мореплавания являются Международные правила предупреждения столкновения судов в море 1972 г. (МППСС-72). Прежде чем стать международно-правовыми стандартами, МППСС прошли длительную эволюцию в виде международных и национальных обычаев, в результате чего стали стандартами обычной или хорошей морской практики, т. е. такой практики мореплавания, которая надежно обеспечивала безопасное расхождение судов, если капитаны неуклонно соблюдали установленные правила. В правиле 2 а МППСС-72 указано, что *«Ничто в настоящих Правилах не может освободить ни судно, ни его владельца, ни капитана, ни экипаж от ответственности за последствия, могущие произойти от невыполнения этих правил или от пренебрежения какой-либо предосторожностью, соблюдение которой требуется обычной морской практикой или особыми обстоятельствами данного случая»*.

Носителем знаний хорошей морской практики является, в первую очередь, капитан как наиболее квалифицированный и опытный судоводитель. Следовать стандартам хорошей морской практики означает своевременно и тщательно учитывать ряд факторов и выполнять следующий ряд условий: правильная оценка условий плавания, фактической и прогнозируемой гидрометеорологической обстановки, навигационно-гидрографической характеристики района плавания, а также возможностей судна и судовой техники; тщательный и полный учет окружающей обстановки и ее изменений с наиболее эффективным использованием судовых средств наблюдения применительно к каждому конкретному случаю; правильный выбор времени, места и способа постановки судна на якорь; доведение до конца начатого маневра и др. В связи с таким пониманием обязанностей капитана по обеспечению безопасности судна в зарубежной литературе отмечалось, что определение хорошей морской практики — это вопрос факта, и его следует решать исходя из совокупности всех конкретных обстоятельств кораблекрушения или аварии. В качестве крат-

кого определения следует отметить, что хорошая морская практика — это здравый смысл плюс опыт поколений, помноженный на знания и примененный к месту.

Термин «хорошая морская практика» используется в специальной литературе и судебно-арбитражной практике намного чаще, чем «обычная морская практика». Однако во всех этих случаях речь идет об *обычной морской практике*, т. е. о таких стандартах поведения, в первую очередь капитана, которые признаются судебно-арбитражными органами в качестве правовых обычаев (как это указано в правиле 2а МППСС-72). Что касается термина «хорошая морская практика», как это указано в правиле 8а МППСС-72 [11], то он означает то же самое, что и термин «обычная морская практика», хотя акцентирует внимание не на содержании стандарта, а на четком, полном и своевременном выполнении капитаном стандартов обычной морской практики. Отсюда следует, что правильнее говорить *обычная морская практика*, оставив термин «хорошая морская практика» за пределами строго юридического анализа.

На основе ранее изложенного можно сделать вывод о том, что понятие «обычная морская практика» включает в себя не только собственно национальные и международные обычаи, но и любые иные международные и национальные стандарты безопасности мореплавания, в том числе местные правила, которые, в свою очередь, могут быть национальными или международными региональными, однако при этом возникает вопрос: *каким образом будут реализованы правила хорошей морской практики на беспилотных судах.*

Требования к комплектованию экипажей судов. Согласно Конвенции ООН 1982 г. [13], каждое государство в отношении судов, плавающих под его флагом, принимает меры по комплектованию и обучению экипажей судов. Судно должно возглавляться капитаном и офицерами соответствующей квалификации, в частности, в области судовождения, связи, судовых машин и оборудования, а экипаж по квалификации и численности должен соответствовать типу, размерам и оборудованию судна.

В соответствии с правилом 13 гл. V Приложения к Конвенции СОЛАС-74, государства должны принимать меры к тому, чтобы с позиций охраны человеческой жизни на море все суда были укомплектованы экипажем в надлежащем количестве и должной квалификации. Согласно Принципам безопасного укомплектования судна экипажем, в соответствии с Резолюцией А.481 (XII) ИМО, при определении минимального состава экипажа судна должны обеспечиваться: организация и принципы несения вахты на судне в соответствии с правилом VIII/2 ПДНВ-78. При применении этих принципов государства-участники учитывают требования, установленные Международной организацией труда (МОТ) [14], Международным союзом электросвязи (МСЭ) и Всемирной организацией здравоохранения (ВОЗ) в отношении несения вахты, рабочего времени и времени отдыха, организации безопасности, помещений для экипажа, дипломирования моряков, их обучения и т. д.

Прил. 1. Принципы безопасного состава экипажа Резолюции А.890(21), принятой 25 ноября 1999 г. [15]. Изучив указанный документ, непонятно, каким образом он будет реализовываться при эксплуатации беспилотных судов.

Оказание помощи людям, терпящим бедствие. При ответе на вопрос о том, как быть с оказанием помощи судам, терпящим бедствие с экипажами на борту, следует отметить, что оказание помощи судам, терпящим бедствие, осуществляется в соответствии с Кодексом торгового мореплавания Российской Федерации (КТМ РФ) [16], Уставом службы на судах, Уголовным кодексом РФ, международными конвенциями и соглашениями Правительства Российской Федерации с иностранными государствами о сотрудничестве при спасании человеческих жизней на море.

Международная конвенция для объединения некоторых правил относительно оказания помощи и спасания на море 1910 г.

Статья 11.

«Каждый капитан обязан, насколько он может это сделать без серьезной опасности для своего судна, своего экипажа, своих пассажиров, оказать помощь всякому лицу, даже враждебному, встреченному в море в опасности погибнуть».

Международная конвенция по охране человеческой жизни на море 1974 г. (Конвенция СОЛАС-74, Правило 10 гл. V):

«а) Капитан судна, находящегося в море, получив из любого источника сообщение о том, что судно, летательный аппарат или их спасательная шлюпка или плот терпят бедствие, обязан полным ходом следовать на помощь людям, терпящим бедствие, сообщив, если это возможно, им об этом».

Конвенция ООН по морскому праву 1982 г.

Статья 98. Обязанность оказания помощи.

«1. Каждое государство вменяет в обязанность капитану любого судна, плавающего под его флагом, в той мере, в какой капитан может это сделать, не подвергая серьезной опасности судно, экипаж или пассажиров:

- а) оказывать помощь любому обнаруженному в море лицу, которому угрожает гибель;
- б) следовать со всей возможной скоростью на помощь терпящим бедствие, если ему сообщено, что они нуждаются в помощи, поскольку на такое действие с его стороны можно разумно рассчитывать».

КТМ РФ (1999 г.)

Статья 62. Обязанность оказать помощь любому лицу, терпящему бедствие на море.

«1. Капитан судна обязан, если он может это сделать без серьёзной опасности для своего судна и находящихся на нём людей, оказать помощь любому лицу, терпящему бедствие на море.

2. За нарушение обязанности, указанной в пункте 1 настоящей статьи, капитан судна несёт уголовную ответственность в соответствии с уголовным законодательством РФ».

В данном случае вопрос о том, какие алгоритмы должны быть реализованы в системе управления беспилотным судном для решения указанных задач, остается открытым.

Заключение (Conclusion)

Необходимо отметить, что несмотря на отмеченный в статье «нормативный вакуум» лишь некоторых аспектов беспилотных судов, данный вопрос имеет право на существование. Однако для его реализации потребуется решение ряда следующих проблем.

1. Внесение существенных коррективов и дополнений к международно-правовым и национальным актам по безопасности мореплавания, касающиеся эксплуатации и использования беспилотных судов.
2. Повышение уровня эксплуатационной надёжности судовых машин и механизмов.
3. Обеспечение качественного мониторинга и контроля за передвижением беспилотных судов в мировом океане в режиме реального времени.
4. Неиспользование беспилотных судов или автономного режима при плавании в прибрежных водах и районах, где интенсивность судоходства очень велика.
5. Осуществление управления судном при входе или выходе из порта полноценным экипажем, который в дальнейшем должен иметь возможность покинуть борт судна безопасным образом.
6. Реализация устойчивых алгоритмов кибербезопасности как самих беспилотных судов, так и линий связи, используемых ими.
7. Пересмотр процедур планирования рейса, прием и сдача груза и оказание помощи людям, терпящим бедствие, а также пересмотр понятия *обычная морская практика*.
8. Разработка требований к персоналу (численности и квалификации), осуществляющему обслуживание и удаленное управление безэкипажным судном.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Зайцев А. И. Беспилотные технологии на водном транспорте — реальность и перспективы / А. И. Зайцев, В. В. Каретников, А. А. Сикарев // Морская радиоэлектроника. — 2017. — № 3(61). — С. 6–9.

2. Каретников В. В. Перспективы внедрения безэкипажного судоходства на внутренних водных путях Российской Федерации / В. В. Каретников, И. В. Пашенко, А. И. Соколов // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2017. — Т. 9. — № 3. — С. 619–627. DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-3-619-627.
3. Maritime Unmanned Navigation through Intelligence in Networks [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <http://www.unmanned-ship.org/munin/> (дата обращения — 16.09.2017).
4. Jokioinen E. Remote and Autonomous Ships — The next steps / E. Jokioinen, J. Poikonen, M. Hyvönen, A. Kolu, [etc.]. — London: AAWA Position Paper, Rolls-Royce, 2016. — 88 p.
5. Automated Ships Ltd [Электронный ресурс]. — Режим доступа: www.automatedshipsltd.com (дата обращения — 16.09.2017).
6. Mitsui O.S.K. Lines, Ltd. [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <http://www.mol.co.jp> (дата обращения — 16.09.2017).
7. Allianz Group [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://www.allianz.com/en/> (дата обращения — 16.09.2017).
8. Moore Stephens International Limited [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <http://www.moorestephens.com> (дата обращения — 16.09.2017).
9. Международная конвенция по охране человеческой жизни на море (СОЛАС-74). — 309 с.
10. Международная конвенция о подготовке и дипломировании моряков и несении вахты 1978 года (ПДМНВ-78), включая Манильские поправки 2010 года. — Лондон: ИМО, 2013.
11. Международные правила предупреждения столкновений судов в море 1972 года (МППСС-72). — СПб.: ЗАО «ЦНИИМФ», 2010. — 128 с.
12. Резолюция ИМО А.893(21) от 25 ноября 1999 г.
13. Конвенция ООН по морскому праву 1982 г. — 277 с.
14. Конвенция МОТ о труде в морском судоходстве. — Женева: Международное бюро труда, 2006. — 108 с.
15. Резолюция ИМО А.890(21) от 25 ноября 1999 г.
16. Кодекс торгового мореплавания Российской Федерации от 30.04.1999 № 81-ФЗ (ред. от 07.02.2017). — 15 с.

REFERENCES

1. Zaitsev, A.I., V.V. Karetnikov, and A.A. Sikarev. “Unmanned technology at water transport – reality and prospects.” *Marine Radio-electronics* 3(61) (2017): 6–9.
2. Karetnikov, Vladimir V., Ivan V. Pashchenko, and Andrei I. Sokolov. “Prospects of introducing unmanned navigation on inland waterways of the Russian Federation.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 9.3 (2017): 619–627. DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-3-619-627.
3. Maritime Unmanned Navigation through Intelligence in Networks. Web. 16 Sept. 2017 <<http://www.unmanned-ship.org/munin/>>.
4. Jokioinen, E., J. Poikonen, M. Hyvönen, A. Kolu, et al. *Remote and Autonomous Ships – The next steps*. London: AAWA Position Paper, Rolls-Royce, 2016.
5. Automated Ships Ltd. Web. 16 Sept. 2017 <www.automatedshipsltd.com>.
6. Mitsui O.S.K. Lines, Ltd. Web. 16 Sept. 2017 <<http://www.mol.co.jp>>.
7. Allianz Group. Web. 16 Sept. 2017 <<https://www.allianz.com/en/>>.
8. Moore Stephens International Limited. Web. 16 Sept. 2017 <<http://www.moorestephens.com/>>.
9. *Consolidated text of the 1974 Solas Convention*.
10. *International convention on, standards of training, certification and watchkeeping for seafarers, 1978 (STCW 1978), as amended (consolidated text)*. London: IMO, 2013.
11. *International Regulations for Preventing Collisions at Sea, 1972, as amended (COLREG 72)*. SPb.: ZAO “TsNIIMF”, 2010.
12. *IMO Resolution A.893(21)*. 25 Nov. 1999.
13. *Konventsia OON po morskomu pravu 1982 g.*
14. *Konventsia MOT o trude v morskomsudo khodstve*. Zheneva: Mezhdunarodnoe byuro truda, 2006.
15. *IMO Resolution A.890(21)*. 25 Nov. 1999.
16. *Kodeks torgovogo moreplavaniya Rossiiskoi Federatsii ot 30.04.1999 N 81-FZ (red. ot 07.02.2017)*.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Дмитриев Владимир Иванович —
кандидат технических наук, доцент
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала
С.О. Макарова»
198035, Российская Федерация, Санкт-Петербург,
ул. Двинская, 5/7
e-mail: vlidmi@mail.ru, kaf_svvp@gumrf.ru
Каретников Владимир Владимирович —
доктор технических наук, доцент
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени
адмирала С. О. Макарова»
198035, Российская Федерация, Санкт-Петербург,
ул. Двинская, 5/7
e-mail: spguwc-karetnikov@yandex.ru,
kaf_svvp@gumrf.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Dmitriev, Vladimir I. —
PhD, associate professor
Admiral Makarov State University of Maritime
and Inland Shipping
5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg, 198035,
Russian Federation
e-mail: vlidmi@mail.ru, kaf_svvp@gumrf.ru
Karetnikov, Vladimir V. — Dr. of Technical
Sciences, associate professor
Admiral Makarov State University of Maritime
and Inland Shipping
5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg, 198035,
Russian Federation
e-mail: spguwc-karetnikov@yandex.ru,
kaf_svvp@gumrf.ru

Статья поступила в редакцию 15 октября 2017 г.

Received: October 15, 2017.

DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-6-1159-1167

ASSESSMENT OF A METHOD ERROR OF DEAD RECKONING OF A VESSEL'S LATITUDE

V. V. Deryabin

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

An expression for an upper limit of an absolute value of a method error of dead reckoning for a vessel's geodetic latitude has been derived. The error occurs due to simplification of a corresponding dead reckoning equation. The simplification of the equation is a conversion of an integrated function which depends on latitude and cannot be expressed as an elementary function to a function value at a minimum value of latitude. The expression for the upper limit is true when a geodetic height of a ship is constant during her motion. It does not take into account computational error and other method error resulting from integration of a northern velocity component as well. Dependencies of the upper limit have been analysed. The upper limit depends on a maximum absolute value of a northern speed; geodetic height; semi-major axis and eccentricity of an ellipsoid; a difference between maximum and minimum of an absolute value of latitude. It has been determined when the method error takes a maximum absolute value. Corresponding error calculations have been carried out for different speed modes and time of a vessel's sailing. A distinctive feature of the proposed method of solving of dead reckoning equation is, that it is possible to get the upper limit of the absolute value of the method error on the basis of a maximum absolute value of a ship's northern speed within a certain time interval and of its length. Being complemented with corresponding expressions for a geodetic longitude, proposed calculation methods may be used for testing of other dead reckoning algorithms.

Keywords: vessel's geodetic latitude, dead reckoning formulas, Cauchy's task, approximate solution, method error, upper limit.

For citation:

Deryabin, Victor V. "Assessment of a method error of dead reckoning of a vessel's latitude." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 9.6 (2017): 1159–1167. DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-6-1159-1167.

УДК. 656.61.052:527.61

ОЦЕНКА ПОГРЕШНОСТИ МЕТОДА СЧИСЛЕНИЯ ШИРОТЫ СУДНА

В. В. Дерябин

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

Получено выражение для верхней границы модуля погрешности метода счисления геодезической широты судна, возникающей в результате упрощения соответствующего уравнения счисления. Упрощение заключается в переходе от уравнения счисления широты, содержащего под знаком интеграла выражение, зависящее от широты и не выражающееся через её элементарные функции, к уравнению, где указанное выражение считается всегда равным его значению при минимальной по модулю широте. Выражение для верхней границы справедливо, когда при движении геодезическая высота судна остаётся постоянной. Оно не учитывает вычислительную погрешность, а также другую погрешность метода, связанную с интегрированием северной составляющей скорости. Проанализированы зависимости верхней границы модуля погрешности метода от максимального модуля северной составляющей скорости движения судна, его геодезической высоты, значений большой полуоси и эксцентриситета эллипсоида вращения, разности наибольшего и наименьшего значений модулей широты. Определены условия, когда погрешность достигает наибольшего по модулю значения. Проведены расчёты верхней границы модуля погрешности с использованием выведенного соотношения для различных скоростных режимов и продолжительности плавания судна. Отличительной особенностью предлагаемого варианта приближённого решения уравнения счисления для широты является возможность получения верхней границы модуля погрешности метода, воз-

никающей в результате упрощения уравнения счисления, на основе наибольшего значения модуля северной составляющей скорости в пределах данного отрезка времени и его длины. Предлагаемые расчётные соотношения, дополненные соответствующими выражениями для долготы, могут использоваться для тестирования других алгоритмов счисления.

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

Для цитирования:

Дерябин В. В. Оценка погрешности метода счисления широты судна / В. В. Дерябин // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2017. — Т. 9. — № 6. — С. 1159–1167. DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-6-1159-1167.

Введение

Любая система счисления характеризуется постепенной потерей точности в результате действия ряда причин. К таким причинам относятся неопределённости исходных данных, вычислительные процедуры, а также использование приближённых методов решения задачи. Изучению влияния погрешностей на точность счислимого места судна посвящено большое количество исследований. Однако они имеют определённые ограничения. Например, в работах [1]–[6] рассматриваются в основном погрешности исходных данных. Остальные же источники погрешностей изучены в меньшей степени или не рассматриваются вообще. В частности, недостаточно исследован вопрос, связанный с погрешностью используемого метода. При выборе геометрической поверхности, на которой выполняется счисление, более корректным является решение задачи счисления на эллипсоиде вращения, чем на сфере. В такой постановке задача формулируется, например, в работах [7], [8]. Постановка задачи на эллипсоиде приводит к системе дифференциальных уравнений, решить которую точными методами в настоящее время невозможно.

Уравнение счисления для широты может быть представлено в виде уравнения с разделяющимися переменными, точное решение которого невозможно получить по двум причинам. Во-первых, в левой части широта является аргументом функции, первообразная которой не выражается через элементарные функции широты. Во-вторых, в правой части северная составляющая скорости судна (как функция времени) не имеет аналитического описания и, следовательно, её первообразная также не может быть выражена через элементарные функции времени. Так как нет точного решения для широты, то и для долготы также не будет точного решения, поскольку уравнение счисления долготы содержит широту. Остаётся лишь использовать приближённые методы, которые представлены двумя основными подходами к решению дифференциальных уравнений.

Первый подход заключается в использовании численных методов, которые представлены двумя большими группами. Первую группу образуют методы Рунге-Кутты [9], [10]. Для оценки их погрешности требуется знание производных искомой (неизвестной) функции, начиная со второго порядка и выше. Точное значение указанных производных невозможно получить, так как искомая функция не задана аналитически. Предельные значения указанных производных можно оценить лишь на основе той или иной методики, полную адекватность которой невозможно гарантировать. Даже для оценки погрешности метода Эйлера требуется оценить сверху модуль северной составляющей ускорения судна, что сделать не так просто, как для соответствующей составляющей скорости. Для оценки границ производных скорости более высокого порядка получить решение ещё сложнее. Вторую группу образуют разностные методы (формулы Адамса являются наиболее употребительными). В их основу положена замена производной искомой функции (правой части уравнения в задаче Коши) интерполирующей функцией, которая выражается через элементарные функции и поэтому легко интегрируется точно. Фактический вид заменяемой функции неизвестен. Оценить степень её отклонения от интерполирующей функции можно по значениям производных от заменяемой функции. Указанные производные могут быть оценены лишь приближённо. Таким образом, основная проблема использования численных методов для интегрирования широтного уравнения счисления заключается в том, что точно оценить

погрешность метода невозможно, так как невозможно точно определить промежутки возможных значений северной составляющей ускорения и её производных.

В работе [7] предлагается приближённое решение поставленной задачи, базирующееся на трёх принципах:

- замене производной дуги меридиана по широте отношением соответствующих конечных приращений;
- предположении о постоянстве курса в пределах промежутка времени, длина которого выбрана в качестве дискретности при расчётах;
- предположении о постоянстве радиуса кривизны меридиана в пределах указанного промежутка.

Очевидно, что этот путь близок к численному интегрированию, и, следовательно, имеет указанный ранее недостаток.

Второй подход состоит в использовании упрощений, позволяющих решить широтное дифференциальное уравнение с гарантированной точностью. Такое решение можно использовать для тестирования других алгоритмов счисления на стадии разработки или применения в навигационной аппаратуре. Целью настоящего исследования является получение соотношения для верхней границы модуля погрешности метода счисления геодезической широты судна, возникающей в результате упрощения соответствующего уравнения счисления, основанного на сохранении третьего принципа, но не использующего первый и второй принципы.

Математическая формулировка задачи

Дифференциальные уравнения счисления пути судна, движущегося по поверхности эллипсоида, имеют следующий вид [11], [12]:

$$\begin{aligned}\frac{d\varphi}{dt} &= \frac{V_N}{M}, \\ \frac{d\lambda}{dt} &= \frac{V_E}{N \cos \varphi},\end{aligned}\quad (1)$$

где φ, λ — геодезические широта и долгота центра тяжести судна; V_N и V_E — северная (по направлению меридиана) и восточная (по направлению параллели) составляющие абсолютной скорости судна; K — истинный курс судна; M — радиус кривизны меридианного эллипса « h -эллипсоида» [11] в точке, где расположен центр тяжести судна; N — радиус кривизны первого вертикала « h -эллипсоида» в той же точке.

Главные радиусы кривизны зависят от широты φ и определяются следующим образом:

$$M = \frac{(a+h)(1-e^2)}{\sqrt{(1-e^2 \sin^2 \varphi)^3}}; \quad N = \frac{a+h}{\sqrt{1-e^2 \sin^2 \varphi}},$$

где a — большая полуось эллипсоида; e — эксцентриситет меридианного эллипса; h — геодезическая высота центра тяжести судна, которую в дальнейшем будем считать величиной постоянной.

Перепишем соотношения (1) с учётом выражений, определяющих радиусы кривизны:

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

или в сокращённой форме:

$$\begin{aligned}\frac{d\varphi}{dt} &= f(t, \varphi); \\ \frac{d\lambda}{dt} &= g(t, \varphi),\end{aligned}\quad (3)$$

где f, g — некоторые непрерывные функции.

Уравнения (3) образуют частный случай нормальной системы дифференциальных уравнений, правые части которых не зависят от долготы λ . При этом сначала необходимо решить первое уравнение, а затем уже второе, так как в последнем фигурирует значение широты φ — решение первого уравнения. Поэтому сосредоточимся на решении первого уравнения в соотношениях (2):

$$\frac{d\varphi}{dt} = \frac{1}{(a+h)(1-e^2)} \sqrt{(1-e^2 \sin^2 \varphi)^3} V_N(t). \quad (4)$$

Это уравнение первого порядка, разрешённое относительно производной $\frac{d\varphi}{dt}$, представленное в форме для задачи Коши. Перепишем уравнение (4) в виде уравнения с разделяющимися переменными:

$$\frac{1}{\sqrt{(1-e^2 \sin^2 \varphi)^3}} d\varphi = \frac{1}{(a+h)(1-e^2)} V_N(t) dt. \quad (5)$$

Применив к обеим частям уравнения (5) операцию интегрирования по времени на промежутке $[0; t]$, получим соотношение:

$$\int_0^t \frac{1}{\sqrt{(1-e^2 \sin^2 \varphi)^3}} d\varphi = \frac{1}{(a+h)(1-e^2)} \int_0^t V_N(t) dt. \quad (6)$$

Решение данного уравнения возможно только приближёнными методами ввиду следующих причин:

- подынтегральное выражение левой части не имеет первообразной, выражающейся в конечном виде через элементарные функции;
- подынтегральное выражение правой части также не имеет первообразной, которая выражается через элементарные функции в силу того, что на практике составляющая скорости $V_N(t)$ не имеет аналитического описания как функция времени, а задается в виде временной последовательности значений, полученных в результате измерений.

Рассмотрим вариант приближённого решения, связанного с указанной ранее первой причиной.

Вариант приближённого решения

Примем $\sqrt{(1-e^2 \sin^2 \varphi)^3} \equiv \sqrt{(1-e^2 \sin^2 (\min|\varphi|))^3}$, где $\min|\varphi|$ — наименьшее возможное значение модуля широты в процессе плавания. Тогда в левой части получается разность значений широт $\varphi(t) - \varphi(0)$, взятых в текущий и начальный моменты времени, умноженная на величину $1/\sqrt{(1-e^2 \sin^2 (\min|\varphi|))^3}$. Возникает следующий вопрос: «Какова погрешность, происходящая от подобной замены?». Перепишем уравнение (4) с учётом начального условия $\varphi(0)$ в следующем эквивалентном виде:

$$\varphi(t) = \varphi(0) + \frac{1}{(a+h)(1-e^2)} \int_0^t \sqrt{(1-e^2 \sin^2 \varphi(t))^3} V_N(t) dt. \quad (7)$$

С учётом замены $\sqrt{(1-e^2 \sin^2 \varphi)^3} \equiv q_{\max} := \sqrt{(1-e^2 \sin^2 (\min|\varphi|))^3}$ переходим к приближённому уравнению

$$\tilde{\varphi}(t) = \varphi(0) + \frac{q_{\max}}{(a+h)(1-e^2)} \int_0^t V_N(t) dt. \quad (8)$$

Разность соотношений (7) и (8) даёт абсолютную погрешность метода A , вызванную предположением, что $\sqrt{(1-e^2 \sin^2 \varphi)^3} \equiv \sqrt{(1-e^2 \sin^2 (\min|\varphi|))^3}$:

$$A = \tilde{\varphi}(t) - \varphi(t) = \frac{1}{(a+h)(1-e^2)} \int_0^t \left[q_{\max} - \sqrt{(1-e^2 \sin^2 \varphi(t))^3} \right] V_N(t) dt. \quad (9)$$

Формулу (9) невозможно использовать для получения точного значения погрешности A , так как неизвестны широта $\varphi(t)$ и северная составляющая абсолютной скорости судна $V_N(t)$ как аналитические функции, позволяющие точное вычисление интеграла правой части выражения (9).

Величина $q_{\max} - \sqrt{(1 - e^2 \sin^2 \varphi(t))^3} \leq q_{\max} - \sqrt{(1 - e^2 \sin^2 (\max |\varphi|))^3}$ для любого момента времени t , где $\max |\varphi|$ — наибольшее из возможных значений модуля широты в процессе плавания. Введём обозначение $q_{\min} = \sqrt{(1 - e^2 \sin^2 (\max |\varphi|))^3}$.

Если $V_N(t) \geq 0$ то $(q_{\max} - \sqrt{(1 - e^2 \sin^2 \varphi(t))^3})V_N(t) \leq (q_{\max} - q_{\min})V_N(t)$. В противном случае, $(q_{\max} - \sqrt{(1 - e^2 \sin^2 \varphi(t))^3})V_N(t) \geq (q_{\max} - q_{\min})V_N(t)$.

При $V_N(t) \geq 0$

$$\int_0^t [q_{\max} - \sqrt{(1 - e^2 \sin^2 \varphi(t))^3}] V_N(t) dt \leq (q_{\max} - q_{\min}) \cdot \int_0^t V_N(t) dt \leq (q_{\max} - q_{\min}) \cdot \max[V_N(t)] \cdot t, \quad (10)$$

где $\max[V_N(t)]$ — наибольшее из возможных значений северной составляющей скорости в процессе плавания.

При отрицательных $V_N(t)$

$$\int_0^t [q_{\max} - \sqrt{(1 - e^2 \sin^2 \varphi(t))^3}] V_N(t) dt \geq (q_{\max} - q_{\min}) \cdot \int_0^t V_N(t) dt \geq (q_{\max} - q_{\min}) \cdot \min[V_N(t)] \cdot t, \quad (11)$$

где $\min[V_N(t)]$ — наименьшее из возможных значений составляющей северной скорости.

Сравнивая (10) и (11), получим следующее:

$$(q_{\max} - q_{\min}) \cdot \min[V_N(t)] \cdot t \leq \int_0^t [q_{\max} - \sqrt{(1 - e^2 \sin^2 \varphi(t))^3}] V_N(t) dt \leq (q_{\max} - q_{\min}) \cdot \max[V_N(t)] \cdot t.$$

При условии, что $\max[V_N(t)] = -\min[V_N(t)] = \max|V_N(t)|$, можно сделать следующий вывод:

$$\left| \int_0^t [q_{\max} - \sqrt{(1 - e^2 \sin^2 \varphi(t))^3}] V_N(t) dt \right| \leq (q_{\max} - q_{\min}) \cdot \max|V_N(t)| \cdot t, \quad (12)$$

где $\max|V_N(t)|$ — наибольший модуль северной составляющей скорости судна в процессе плавания.

Соотношение (12) справедливо, когда на всем промежутке времени t северная составляющая скорости $V_N(t)$ имеет либо только неотрицательные, либо только отрицательные значения. Но что делать, когда указанная функция знакопеременная и в процессе плавания t изменяет знак сколь угодно большое количество раз? Очевидно, следует использовать оценку (12) на каждом промежутке с постоянным знаком функции отдельно. Как только функция поменяет знак, нужно начинать оценку заново до следующего изменения знака функции. Пусть m — количество промежутков, на которых функция $V_N(t)$ сохраняет свой знак. Пусть каждый из таких промежутков имеет свою продолжительность: $\tau_1, \tau_2, \dots, \tau_m$. Тогда применяя для каждого такого промежутка формулу (12), получим, что модуль интеграла в соотношении (12) на каждом промежутке ограничен сверху величинами $(q_{\max} - q_{\min}) \cdot \max|V_N(t)| \tau_1, \dots, (q_{\max} - q_{\min}) \cdot \max|V_N(t)| \tau_m$, т. е. имеют место следующие неравенства:

$$\begin{aligned} \left| \int_0^{\tau_1} [q_{\max} - \sqrt{(1 - e^2 \sin^2 \varphi(t))^3}] V_N(t) dt \right| &\leq (q_{\max} - q_{\min}) \cdot \max|V_N(t)| \cdot \tau_1; \\ \left| \int_{\tau_1}^{\tau_1 + \tau_2} [q_{\max} - \sqrt{(1 - e^2 \sin^2 \varphi(t))^3}] V_N(t) dt \right| &\leq (q_{\max} - q_{\min}) \cdot \max|V_N(t)| \cdot \tau_2; \\ &\dots \\ \left| \int_{\tau_1 + \dots + \tau_{m-1}}^{\tau_1 + \dots + \tau_m = t} [q_{\max} - \sqrt{(1 - e^2 \sin^2 \varphi(t))^3}] V_N(t) dt \right| &\leq (q_{\max} - q_{\min}) \cdot \max|V_N(t)| \cdot \tau_m. \end{aligned} \quad (13)$$

Складывая указанные неравенства, а также учитывая, что модуль суммы всегда не больше суммы модулей слагаемых, получаем соотношение, в точности совпадающее с выражением (12). Таким образом, соотношение (12) можно использовать и для случая, когда северная составляющая скорости меняет знак в процессе плавания, что характерно, например, при плавании вдоль параллели.

Результаты

Умножив обе части неравенства (12) на величину $1 / ((a + h)(1 - e^2))$, получим окончательную верхнюю границу модуля ошибки метода A , возникающей вследствие предположения, что $\sqrt{(1 - e^2 \sin^2 \varphi)^3} \equiv \sqrt{(1 - e^2 \sin^2 (\min |\varphi|))^3}$:

$$\left| \frac{1}{(a + h)(1 - e^2)} \int_0^t [q_{\max} - \sqrt{(1 - e^2 \sin^2 \varphi(t))^3}] V_N(t) dt \right| \leq \frac{1}{(a + h)(1 - e^2)} (q_{\max} - q_{\min}) \cdot \max |V_N(t)| \cdot t$$

или в сокращённом виде

$$|A| \leq \frac{1}{(a + h)(1 - e^2)} \left(\sqrt{(1 - e^2 \sin^2 (\min |\varphi|))^3} - \sqrt{(1 - e^2 \sin^2 (\max |\varphi|))^3} \right) \cdot \max |V_N(t)| \cdot t. \quad (14)$$

Видно, что верхняя граница модуля погрешности зависит от времени линейно, а коэффициент пропорциональности при этом выступает величина

$$k_A = \frac{1}{(a + h)(1 - e^2)} \left(\sqrt{(1 - e^2 \sin^2 (\min |\varphi|))^3} - \sqrt{(1 - e^2 \sin^2 (\max |\varphi|))^3} \right) \cdot \max |V_N(t)|,$$

которую будем в дальнейшем называть *коэффициентом погрешности метода*, вызванной заменой величины $\sqrt{(1 - e^2 \sin^2 \varphi)^3} \equiv \sqrt{(1 - e^2 \sin^2 (\min |\varphi|))^3}$. Проанализировав данный коэффициент, можно сделать следующие заключения:

- чем больше большая полуось a , тем меньше коэффициент ошибки метода k_A и наоборот;
- чем больше постоянная высота над поверхностью эллипсоида h , тем меньше коэффициент k_A , и наоборот;
- чем больше максимальный модуль скорости $\max |V_N(t)|$, тем больше k_A и наоборот.

Сложнее обстоят дела с изучением зависимости k_A от эксцентриситета e . Производная $\frac{dk_A}{de}$ имеет следующий вид (когда $\min |\varphi| = 0$; $\max |\varphi| = 90^\circ$):

$$\frac{dk_A}{de} = \frac{\max |V_N(t)|}{a + h} \frac{2e}{(1 - e^2)^2} \left(1 + \frac{1}{2} \sqrt{(1 - e^2)^3} \right). \quad (15)$$

Последний множитель в этом соотношении всегда больше нуля при любых $e \in [0; 1]$, т. е. получается следующее:

- чем больше эксцентриситет e , тем больше коэффициент погрешности метода k_A (когда $\min |\varphi| = 0$; $\max |\varphi| = 90^\circ$) и наоборот;
- чем больше разность наибольшего и наименьшего значений модуля широты $\max |\varphi| - \min |\varphi|$, тем больше коэффициент погрешности метода и наоборот.

Выясним условия, при которых модуль фактической ошибки метода $|A|$ будет приближаться к его верхней границе при заданных величинах a , h , e , $\min |\varphi|$, $\max |\varphi|$, $\max |V_N(t)|$, t . Для этого проанализируем соотношения (10) и (11). Знаки $\leq$, $\geq$ в указанных соотношениях и следовательно, наибольшая погрешность соответствуют случаю, когда в продолжение времени плавания t выполняются условия:

а) $\sqrt{(1 - e^2 \sin^2 \varphi(t))^3} = q_{\min}$, т. е. когда $|\varphi(t)| = \max |\varphi| \forall t$;

б) $|V_N(t)| = \max |V_N(t)| \forall t$.

Очевидно, что условие а) не может быть в точности выполнено, если $\min|\varphi| < \max|\varphi|$. Поэтому верхняя граница, определённая согласно выражению (14), в точности недостижима. Можно показать, что соотношение (14) для оценки погрешности A будет получено и в том случае, если в соотношении (8) использовать вместо величины $q_{\max}$ величину $q_{\min}$. При этом результат расчётов будет, конечно, отличаться от полученного при помощи соотношения (8). Также в условии а) необходимо произвести замену $q_{\min} := q_{\max}$. Возникает закономерный вопрос: «Какой вариант формулы (8) ($q_{\min}$ или $q_{\max}$) будет более точным в текущих условиях плавания?». Очевидно, что если судно находится ближе к минимальной (по модулю широты) параллели, то в выражении (8) следует использовать $q_{\min}$, если ближе к максимальной (по модулю широты) — $q_{\max}$. Если судно находится на средней широте, то безразлично, какой вариант формулы (8) использовать. Следует отметить, что во всех случаях оценка погрешности будет определяться соотношением (14).

Выполним расчёты по формуле (14) для судов, имеющих различную максимальную скорость хода, движущихся на поверхности общеземного эллипсоида WGS-84 ($a = 6378137$ м, $e^2 = 2\alpha - \alpha^2 = 2(1/298,257223563) - (1/298,257223563)^2 \approx 0,006694379990141$) в течение различных периодов плавания. Считается, что движение происходит на поверхности эллипсоида ($h = 0$), а также $\min|\varphi| = 0$; $\max|\varphi| = 90^\circ$. Результаты представлены в следующей таблице.

Верхняя граница модуля ошибки метода определения широты A
(в угловых минутах (') или градусах (°))

Типы судов	Наибольшая скорость $\max V_N(t) $, уз	Время плавания, ч, сут					
		один час	четыре часа	одни сутки	семь суток	14 суток	28 суток
Суда, занятые буксировкой и другими подобными работами	10	0,1'	0,4'	2,4'	16,9'	33,9'	1,1°
Сухогрузы универсальные	15	0,2'	0,6'	3,6'	25,4'	50,8'	1,7°
Контейнеровозы, паромы, пассажирские суда	25	0,3'	1,0'	6,1'	42,3'	1,4°	2,8°
Атомные крейсера	35	0,4'	1,4'	8,5'	59,2'	2,0°	4,0°
Суда на воздушной подушке	60	0,6'	2,4'	14,5'	1,7°	3,4°	6,8°
Экранопланы	300	3,0'	12,1'	1,2°	8,5°	16,9°	33,9°

Обсуждение результатов

Расчёты показывают, что следуя на универсальном сухогрузе вдоль меридиана со скоростью 15 уз в течение четырёхчасовой вахты, можно получить погрешность в определении широты, не превосходящую по абсолютному значению 0,6', если в формуле (8) примем $q_{\max} = 1$ ($\min|\varphi| = 0^\circ$), а в выражении (14) установим $\min|\varphi| = 0$; $\max|\varphi| = 90^\circ$. К значению 0,6' модуль ошибки метода будет приближаться тем быстрее, чем скорее удастся выйти на широту $\varphi = \pm 90^\circ$ от нулевого значения. Подобная оценка погрешности выполняется в том случае, когда нет возможности чётко установить широтный диапазон плавания. Например, для рассматриваемого случая сужение широтного диапазона плавания $\min|\varphi| = 60^\circ$; $\max|\varphi| = 70^\circ$ приводит к верхней границе, равной уже 0,1'.

Следует отметить, что формулы (2) можно использовать не только для навигации на поверхности Земли, но также и на любом эллипсоиде вращения. В этом смысле привлекательной выглядит идея оценки погрешности по формуле (14) при определении счислимых координат на поверхности других планет, имеющих большую полуось, меньшую и / или эксцентриситет, больший, чем у Земли. Примером такой планеты в Солнечной системе является Марс [13], для которого параметры большой полуоси a и эксцентриситета e менее благоприятны с точки зрения погрешности метода счисления широты, чем для Земли.

Заключение

Основным результатом настоящего исследования является то, что получено приближённое решение дифференциального уравнения счисления геодезической широты судна, движущегося с постоянной высотой над поверхностью эллипсоида, а также выведено соотношение для гарантированной оценки точности такого решения. Оценка точности получена в виде верхней границы модуля погрешности метода приближённого решения. Приближённое решение при этом не является численным. Проанализированы зависимости указанной границы от скоростного режима судна, его геодезической высоты, разности предельных значений модуля широты, а также параметров того эллипсоида, на котором выполняется счисление широты. Выражение для границы не учитывает погрешности метода численного интегрирования северной составляющей абсолютной скорости судна.

Определены условия, когда погрешность приближённого решения достигает своего предельного значения. Выполнен расчёт верхней границы модуля погрешности метода приближённого решения для различных значений максимального модуля северной составляющей скорости при различной продолжительности плавания на поверхности эллипсоида WGS-84.

Использование предлагаемого упрощённого решения для тестирования других алгоритмов счисления возможно для случаев, когда северная составляющая скорости задаётся как функция времени, интеграл от которой берётся точно. В таком случае границы возможных значений широты определяются с точностью до вычислительной погрешности.

Ошибка в определении широты, возникающая в ходе применения приближённого решения, будет, конечно, влиять и на точность определения долготы, так как скорость изменения во времени последней зависит от радиуса параллели, на которой в данный момент находится судно, а радиус параллели зависит от широты. В связи с этим появляется необходимость получения верхней границы ошибки для долготы, возникающей в результате применения приближённого решения для широты. Если такая граница будет получена, то можно будет определить область неопределённости местоположения судна на эллипсоиде по счислению, появление которой вызвано приближённым решением уравнения счисления для широты.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Беляев Б. Н.* Анализ свойств показателей точности счисления пути и некоторые практические выводы / Б. Н. Беляев // Записки по гидрографии. — 1996. — № 230. — С. 20–28.
2. *Болховитинов В. К.* Счисляемое местоположение подводного робота / В. К. Болховитинов // Системы управления и обработки информации. — 2015. — № 30. — С. 26–37.
3. *Дерябин В. В.* Оценка точности нейросетевой системы счисления пути судна / В. В. Дерябин // Транспорт Российской Федерации. — 2015. — № 4 (59). — С. 40–43.
4. *Карасев В. В.* Обоснование требований к повышению точности измерения скорости корабля и точности счисления / В. В. Карасев, С. А. Верещагин, В. Н. Коломеец // Научные труды Дальневосточного государственного технического рыбохозяйственного университета. — 2009. — № 21. — С. 91–97.
5. *Михальский В. А.* К вопросу о решении задачи оценивания точности счисления / В. А. Михальский // Пятая Российская научно-техническая конференция «Современное состояние и проблемы навигации и океанографии (НО-2004)». — СПб.: ГНИНГИ МО РФ, 2004. — С. 77–81.
6. *Михальский В. А.* Метрология в кораблевождении и решение задач навигации / В. А. Михальский, В. А. Катенин. — СПб.: Элмор, 2009. — 288 с.
7. *Каврайский А. В.* Алгоритмы точного решения прямой и обратной навигационных задач / В. А. Каврайский // Навигация и гидрография. — 2002. — № 14. — С. 126–136.
8. *Пантелеев Н. Ф.* Счисление геодезических координат B , L , h для объектов, движущихся по поверхности Земли / Н. Ф. Пантелеев, В. В. Кузнецов, А. Г. Глазков, А. А. Власова // Труды ФГУП НППЦАП. Системы и приборы управления. — 2010. — № 1. — С. 69–72.
9. *Banachowicz A.* A comparison of numerical solutions of dead reckoning navigation/ A. Banachowicz, A. Wolski // Reports on Geodesy. — 2012. — Vol. 93. — Pp. 49–55.
10. *Wensveen P. J.* A path reconstruction method integrating dead-reckoning and position fixes applied to humpback whales / P. J. Wensveen, L. Thomas, P. J. O. Miller // Movement Ecology. — 2015. — Vol. 3. — Is. 1. — Pp. 31. DOI: 10.1186/s40462-015-0061-6.

11. Бромберг П. В. Теория инерциальных систем навигации / П. В. Бромберг. — М.: Наука, 1979. — 294 с.
12. Дмитриев С. П. Высокоточная морская навигация / С. П. Дмитриев. — СПб.: Судостроение, 1991. — 222 с.
13. Archinal B. A. Report of the IAU Working Group on Cartographic Coordinates and Rotational Elements: 2009 / B. A. Archinal, M. F. A'Hearn, E. Bowell, A. Conrad, G. J. Consolmagno, R. Courtin, T. Fukushima, D. Hestroffer, J. L. Hilton, G. A. Krasinsky, G. Neumann, J. Oberst, P. K. Seidelmann, P. Stooke, D. J. Tholen, P. C. Thomas, I. P. Williams // *Celestial Mechanics and Dynamical Astronomy*. — 2011. — Vol. 109. — Is. 2. — Pp. 101–135. DOI: 10.1007/s10569-010-9320-4.

REFERENCES

1. Belyaev, B. N. "Analiz svoistv pokazatelei tochnosti schisleniya puti i nekotorye prakticheskie vyvody." *Zapiski po gidrografii* 230 (1996): 20–28.
2. Bolkhovitinov, V. K. "Schislyaemoe mestopolozhenie podvodnogo robota." *Control and information processing systems*. 30 (2015): 26–37.
3. Deryabin, V. V. "Ocenka tochnosti neyrosetvoy sistemy schisleniya puti sudna." *Transport Rossiyskoy Federacii*. 4(59) (2015): 40–43.
4. Karasev, V. V., S. A. Vereshchagin, and V. N. Kolomoets. "Obosnovanie trebovaniy k povysheniyu tochnosti izmereniya skorosti korablya i tochnosti schisleniya." *Nauchnye trudy dal'nevostochnogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo rybokhozyaistvennogo universiteta* 21 (2009): 91–97.
5. Mikhal'skii, V. A. "K voprosu o reshenii zadachi otsenivaniya tochnosti schisleniya." *Pyataya rossiyskaya nauchno-tekhnicheskaya konferentsiya «Sovremennoe sostoyanie i problemy navigatsii i okeanografii (NO-2004)»*. SPb.: GNINGI MO RF, 2004: 77–81.
6. Mikhal'skii, V. A., and V. A. Katenin. *Metrologiya v korablevozhdenii i reshenie zadach navigatsii*. SPb.: Elmor, 2009.
7. Kavraiskii, A. V. "Algorithms for Precise Solution of the Direct and Inverse Navigation Problems." *Navigation and hydrography* 14 (2002): 126–136.
8. Panteleev, N. F., V. V. Kuznetsov, A. G. Glazkov, and A. A. Vlasova. "Schislenie geodezicheskikh koordinat B, L, h dlya ob'ektov, dvizhushchikhsya po poverkhnosti Zemli." *Trudy FGUP NPTsAP. Sistemy i pribory upravleniya* 1 (2010): 69–72.
9. Banachowicz, Andrzej, and Adam Wolski. "A comparison of numerical solutions of dead reckoning navigation." *Reports on Geodesy* 93 (2012): 49–55.
10. Wensveen, Paul J., Len Thomas, and Patrick JO Miller. "A path reconstruction method integrating dead-reckoning and position fixes applied to humpback whales." *Movement ecology* 3.1 (2015): 31. DOI: 10.1186/s40462-015-0061-6
11. Bromberg, P. V. *Teoriya inertial'nykh sistem navigatsii*. M.: Nauka, 1979.
12. Dmitriev, S. P. *Vysokotochnaya morskaya navigatsiya*. SPb.: Sudostroenie, 1991.
13. Archinal, Brent Allen, M. F. A'Hearn, E. Bowell, A. Conrad, G. J. Consolmagno, R. Courtin, T. Fukushima, D. Hestroffer, J. L. Hilton, G. A. Krasinsky, G. Neumann, J. Oberst, P. K. Seidelmann, P. Stooke, D. J. Tholen, P. C. Thomas, and I. P. Williams. "Report of the IAU working group on cartographic coordinates and rotational elements: 2009." *Celestial Mechanics and Dynamical Astronomy* 109.2 (2011): 101–135. DOI: 10.1007/s10569-010-9320-4.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

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

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

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

Статья поступила в редакцию 22 октября 2017 г.

Received: October 22, 2017.

**ANALYSIS OF THE APPLICABILITY OF THE FORMULAS THE CALCULATION
OF THE LOSS OF SHIPS SPEED DUE TO WIND AND WAVES****A. M. Boyarinov, A. A. Ershov, S. M. Pylayev**Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping,
St. Petersburg, Russian Federation

The article deals with the current issue of calculating ship speed loss due to wave and wind resistance. With this problem faced by all participants in the Maritime transport of cargo from navigators and engineers of ships, which the knowledge of the speed of the ship, it is necessary to calculate parameters of voyage and calculate fuel reserves to the transfer to the ship owners for solving problems of commercial effectiveness and logistics. The opening of Russia's traffic on the Northern sea route, full of winds and storm events increases the urgency of the problem of the forecast of speed of vessels in conditions of wind and sea waves. Wind and waves on the ocean surface caused by the wind are among those hydrometeorological factors navigators often come across when operating a vessel. The International Convention on Standards of Training, Certification and Watchkeeping for Seafarers (STCW) requires that hydrometeorological factors should be taken into account in navigation. Wind and wave effects cause wettablity and slamming (wave impact on the ship bottom) which lead to ship speed loss. Slamming conditions can be calculated using Froude coefficient and wettablity contours. Ship speed at which slamming is eliminated can be calculated on the basis of known parameters of wind driven wave length and height as well as vessel draft. Frequency of enforced speed loss increases with the increase of wind velocity and wave height and can be taken into consideration through repeatability factor. In case a ship is not forced to decrease her speed repeatability factor value is equal to zero. When it comes to 100 % cases that a ship is forced to decrease speed at gale and under rolling sea conditions repeatability factor value is equal to one. Speed loss due to wind and wave effect is the sum total of speed loss as a result of enforced deceleration and as a result of additional resistance to motion caused by wind and wave factors. Mathematical formalism to calculate total speed loss due to wind and wave effect varies greatly. There are numerous formulae to estimate ship speed reduction due to wind and wave effects. In the article the comparative analysis of the practical applicability of the most commonly used formulas for calculating wind and wave loss of speed of the marine vessel. The need for comparative analysis of the practical applicability of these formulas is because most of them were obtain quite long ago based on studies traditional for that time types and displacements of the vessels and some of them give unacceptable results in cases where weather parameters exceed set values. Based on the results of the study this article provides recommendations on the practical use of the considered formulae of wind and wave loss of speed of ships.

Keywords: speed loss due to wind and wave effects, ship speed calculation, formula applicability analysis.

For citation:

Boyarinov, Alexander M., Andrey A. Ershov, and Sergey M. Pylayev. "Analysis of the applicability of the formulas the calculation of the loss of ships speed due to wind and waves." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admiral S. O. Mararova* 9.6 (2017): 1168–1174. DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-6-1168-1174.

УДК 502.51**АНАЛИЗ ПРИМЕНИМОСТИ ФОРМУЛ РАСЧЕТА
ВЕТРО-ВОЛНОВЫХ ПОТЕРЬ СКОРОСТИ ХОДА МОРСКИХ СУДОВ****А. М. Бояринов, А. А. Ершов, С. М. Пылаев**ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова,
Санкт-Петербург, Российская Федерация

Статья посвящена актуальной проблеме расчета ветро-волновых потерь скорости хода морских судов. С этой задачей сталкиваются все участники процесса морской перевозки груза — от судоводителей и судомехаников морских судов, которым знание скорости хода судна необходимо для расчета параметров рейса и запасов топлива, до судовладельцев при решении задач коммерческой эффективно-

сти рейса и логистики. Открытие Россией интенсивного движения судов по Северному морскому пути, особо подверженному ветрам и штормовым явлениям, дополнительно повышает актуальность проблемы прогнозирования скорости морских судов в условиях ветра и волнения. Ветер и волнение, вызванное воздействием ветра на поверхность океана, относятся к гидрометеорологическим факторам, с которыми наиболее часто приходится сталкиваться судоводителям при эксплуатации морского судна. Учет этих гидрометеорологических факторов в судовождении предписывается Международной конвенцией ПДНВ. Обращается внимание на то, что воздействие ветра и волнения на морское судно вызывает возникновение таких явлений, как заливаемость и слеминг (удары волн в днище носовой части судна), что приводит к вынужденному снижению скорости хода судна судоводителями. В настоящее время существуют методы для определения условий возникновения заливаемости с использованием числа Фруда и контуров заливаемости. По известным параметрам длины и высоты ветровой волны, а также осадки судна может быть рассчитана скорость хода, при которой явление слеминга будет отсутствовать. Отмечается, что повторяемость вынужденного снижения скорости морских судов возрастает с увеличением скорости ветра и высоты волны, которая может быть учтена с помощью коэффициента повторяемости. Если судно вынужденно не снижает скорость, то значение коэффициента повторяемости равно нулю. Когда судно в 100 % случаев вынуждено снижать скорость при штормовом ветре и волнении, коэффициент повторяемости равен единице. К ветро-волновым потерям скорости обычно относят суммарные потери морского судна от вынужденного снижения скорости хода и от потери скорости в результате дополнительного сопротивления движению из-за ветра и волнения. Исследованы математические зависимости для расчета суммарных ветро-волновых потерь скорости хода морских судов при ветре и волнении. В настоящей статье выполнен сравнительный анализ практической применимости наиболее часто используемых формул расчета ветро-волновых потерь скорости хода морского судна. Подтверждена необходимость сравнительного анализа в случае практического применения данных формул, вызванная тем, что большинство из них были получены достаточно давно на основе исследования движения судов традиционных для своего времени обводов, типов и водоизмещений. При этом отмечается, что часть из них дает неприемлемые результаты в тех случаях, когда погодные параметры превышают определенные значения. На основании результатов исследования даны рекомендации по практическому использованию рассмотренных формул расчета ветро-волновых потерь скорости хода морских судов.

Ключевые слова: ветро-волновые потери, расчет ветро-волновых потерь, формулы ветро-волновых потерь.

Для цитирования:

Бояринов А. М. Анализ применимости формул расчета ветро-волновых потерь скорости хода морских судов / А. М. Бояринов, А. А. Ершов, С. М. Пылаев // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2017. — Т. 9. — № 6. — С. 1168–1174. DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-6-1168-1174.

Введение (Introduction)

Во время движения морского судна при ветре и взволнованной поверхности моря, особенно при встречных курсовых углах ветра и ветрового волнения морское судно испытывает дополнительное сопротивление своему движению, что приводит к потерям скорости хода. Наиболее интенсивные потери скорости наблюдаются при одновременном усилении скорости ветра и увеличении высоты волны. Эти потери резко возрастают, когда высота волны превышает 3 м, и могут составлять более 25 % скорости судна на тихой воде.

При неизменных и совпадающих курсовых углах ветра и ветрового волнения, а также постоянной частоте вращения гребного вала волновые потери скорости хода судна ΔV_h определяются как функция высоты волны h степенной зависимостью

$$\Delta V_h = ah^b. \quad (1)$$

Увеличение скорости ветра W при неизменной высоте и курсовом угле волны, а также постоянной частоте вращения гребного вала приводят к потерям скорости хода судна ΔV_w , которые определяются логарифмической зависимостью:

$$\Delta V_w = a \lg W - b. \quad (2)$$

В формулах (1) и (2) коэффициенты a и b зависят от типа судна. Зависимость ветровых потерь ΔV_w и волновых потерь ΔV_h от курсовых углов ветра и волнения q_w и q_h носит более сложный характер и отличается большим разнообразием используемых для этой цели формул, приведенных в исследованиях различных авторов.

Учет гидрометеорологических факторов при плавании судов обязателен для судоводителей [1] и недооценка этого важнейшего компонента при проработках маршрута перехода [2], [3] может привести к катастрофическим последствиям [4]. Многие авторы в той или иной степени посвятили свои работы проблеме влияния ветра и волнения на ходкость судов [5] – [8].

Целью исследования настоящей статьи является поиск ответа на вопрос о том, каким формулам для расчета ветро-волновых потерь скорости хода современных судов следует отдать предпочтение.

Методы и материалы (Method and Materials)

Формулы для расчета ветро-волновых потерь скорости хода морских судов можно разделить на три группы:

1-я группа — полученные на основании натурных наблюдений на морских судах после соответствующей статистической обработки этих наблюдений;

2-я группа — полученные в результате испытаний моделей морских судов в лабораторных условиях;

3-я группа — выведенные на основе законов аэро- и гидродинамики и теории морского волнения.

Представление об изменении скорости судов, происходящих под воздействием ветровых волн различной высоты и разных курсовых углов волнения, дает диаграмма Г. Верплогга. Известна также номограмма В. С. Красюка для расчета потерь скорости хода в зависимости от высоты и курсового угла волны с учетом водоизмещения судна. Авторами для сравнительного анализа применимости были выбраны наиболее известные формулы расчета ветро-волновых потерь ходкости судов [6] – [10].

Формула В. В. Дремлюга:

$$\Delta V_w = V_0 - \left[\frac{V_0^2(1 + K_q) - K_q W^2}{1 + K_q} \right]^{\frac{1}{2}} - \frac{K_q W}{1 + K_q} \cdot \cos q_w, \quad (3)$$

где ΔV_w — потери скорости судна из-за ветра, уз; V_0 — скорость судна на тихой воде, уз; W — скорость истинного ветра, м/с; q_w — курсовой угол истинного ветра, град; $K_q = \frac{c_x \cdot S}{81\xi \cdot \Omega}$ — ветровой коэффициент; c_x — коэффициент воздушного сопротивления для соответствующего курсового угла ветра; S — площадь проекции подводной части судна на плоскость миделя, м²; ξ — коэффициент полного сопротивления воды подводной части судна; Ω — смоченная поверхность судна, м².

Формула Б. И. Сайфуллина и Б. А. Андрианова:

$$V = V_0 - (ah + bh^2) + kq_h h, \quad (4)$$

где V — скорость судна на волнении, уз; V_0 — скорость судна на тихой воде, уз; a, b, k — эмпирические коэффициенты, определяемые для каждого типа судна; h — высота волны 3 %-й обеспеченности, м; q_h — курсовой угол волны, град.

Формула А. Н. Крылова:

$$\Delta V_h = A^2 p h^2 c^2 + 2 A p h^2 c (0,5 c \cdot \cos q_h + V_0) - A p h^2 B, \quad (5)$$

где $A = 0,038 \frac{LB}{D}$; $A = 1 - \exp\left(-4 \frac{\pi T}{\lambda}\right)$; ΔV_h — волновая составляющая потерь скорости судна; p — плотность морской воды, т/м³; h — средняя высота волн, м; c — фазовая скорость волн, м/с;

q_h — курсовой угол волн, град; B — ширина судна, м; L — длина судна, м; D — водоизмещение судна, т; λ — вероятнейшая длина волны, соответствующая высоте волны этой обеспеченности, м.

Формула П. М. Хохлова:

$$V = V_0 - (0,745h - 0,275q_h h)(1 - 1,35 \cdot 10^{-6} DV_0), \quad (6)$$

где V — скорость судна на волнении, уз; V_0 — скорость судна на тихой воде, уз; h — высота волны 3 % обеспеченности, м; q_h — курсовой угол волны, рад; D — водоизмещение судна, т.

Формула В. М. Шапаева:

$$R_B = C_x \frac{\rho_B \cdot w^2}{2} S, \quad (7)$$

где R_B — сопротивление движению судна от ветра, кН; C_x — безразмерный коэффициент сопротивления воздуха надводной части корпуса и надстроек судна, обдуваемых ветром; ρ_B — плотность воздуха, т/м³; w — скорость кажущегося ветра, м/с; S — площадь проекции надводной части судна с надстройками рангоутом на плоскость мидель-шпангоута, м².

Формула Давидсона:

$$\Delta R_h = \frac{\rho(V_0 + c)}{2} \frac{Bh}{\pi} (1 - \cos \varphi_n), \quad (8)$$

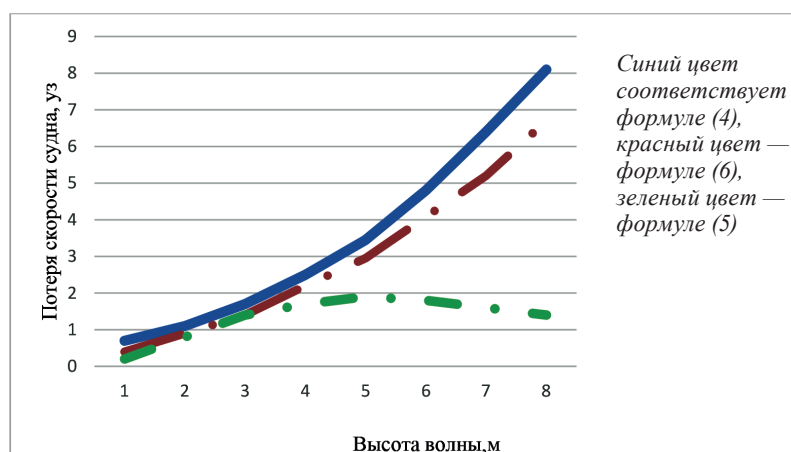
где ΔR_h — дополнительное сопротивление воды из-за встречного регулярного волнения (зыбь), кН; V_0 — скорость на тихой воде, м/с; B — ширина судна, м; h — высота волны, м; φ_n — угол входа носовой ветви ватерлинии, град; ρ — плотность воды, т/м³; c — скорость бега волны, м/с.

Формула Д. В. Дорогостайского:

$$\Delta R_h = l_h \rho h^2 \frac{B^2}{4L}, \quad (9)$$

где ΔR_h — дополнительное сопротивление на регулярном волнении (зыбь), кН; L — длина судна, м; l_h — коэффициент дополнительного сопротивления, определяемый произведением шести функций, аргументами которых являются основные размерения судна и параметры волнения.

Необходимость сравнительного анализа применимости приведенных формул ветро-волновых потерь ходкости морских судов для различных диапазонов погодных параметров вызвана тем, что некоторые формулы дают неприемлемые результаты, когда погодные параметры превышают определенные значения. Для проведения такого анализа использовалась следующая методика. В исследуемую формулу расчета ветро-волновых потерь подставлялись значения соответствующих погодных параметров (скорость ветра, высота ветровой волны) с определенным шагом — от возможных минимальных значений параметров до возможных максимальных. Затем строилась кривая ветро-волновых потерь (либо жестко связанные с этими потерями величины) в зависимости от изменения того или иного погодного параметра. Пример сравнения потерь скорости, рассчитанных по формулам (4) – (6) для транспортного судна «Краснодар», представлен на рисунке.



Сравнение потерь скорости, рассчитанных по формулам (4) – (6) для транспортного судна «Краснодар» (курсовой угол волнения $q_h = 0$)

В заключение было выполнено сравнение результатов вычислений с результатами, полученными на основе результатов натурных испытаний для конкретного судна. Результаты, полученные на основе натурных испытаний (наблюдений) для конкретного судна, принимались за «истинные». Была выполнена подстановка параметров этого конкретного судна и погодных параметров в исследуемые формулы, а также сравнение результатов вычислений с «истинными».

Результаты (Results)

По результатам исследования характера кривой ветро-волновых потерь можно сделать вывод о степени применимости формулы в том или ином диапазоне погодных параметров. В качестве основных критериев при исследовании кривой ветро-волновых потерь использовались следующие. При увеличении (уменьшении) значений погодных параметров при встречных и боковых курсовых углах ветро-волновые потери также должны возрастать (уменьшаться). При этом вид этой зависимости не имеет значения. Совпадение или сходство кривых, рассчитанных по разным формулам, также является подтверждением пригодности этих формул для данного диапазона. Диапазон изменения значений скорости ветра составил 5 – 30 м/с с дискретностью 5 м/с, высота волн — от 1 м до 10 м с дискретностью 1 м.

По приведенной в данном исследовании методике были проанализированы формулы (3) – (9) для различных диапазонов погодных параметров. В результате было установлено, что формулы (4), (6) – (9) дают удовлетворительные результаты по всему исследуемому диапазону скоростей ветра и высоты волнения. Формула (5) оказалась неприемлемой, а формула (8) приемлема лишь при высоте волн до 6 м включительно.

Помимо этого была установлена возможность уточнения формул (4), (6), например, с использованием соответствующих коэффициентов по результатам замера потерь скорости в каждом рейсе в условиях воздействия конкретного ветра и волнения, а также с учетом конкретных параметров загрузки судна. Все это дает возможность судоводителям, судомеханикам, судовладельцам, а также другим участникам транспортного процесса использовать уточненные формулы для расчета потерь скорости хода конкретных современных судов.

Обсуждение (Discussion)

Приведенные в статье формулы ветро-волновых потерь [6] – [10] были проанализированы на предмет возможности их практического применения в случае, когда известны лишь основные параметры судна. При этом дополнительно решался вопрос и о том, какая из формул предпочтительнее, исходя из достоверности получаемых результатов. При решении вопроса о том, какую из формул предпочесть, результаты вычислений сравнивались с результатами, полученными по натурным испытаниям для конкретного судна. Результаты, полученные на основе натурных испытаний для конкретного судна, принимались за «истинные». Параметры этого конкретного судна и погодные параметры подставлялись в испытываемые формулы, и результаты вычислений сравнивались с «истинными». Наибольшее приближение к «истинным» имели результаты, полученные по формуле (6). Несколько «хуже» оказались результаты, полученные по формуле (4), так как они завышались по сравнению с натурными данными.

Выводы

На основании анализа приведенных в статье формул расчета ветро-волновых потерь можно сделать следующие выводы.

1. Формулы (4), (6) – (9) могут использоваться для практического расчета ветро-волновых потерь скорости хода судов. Однако с точки зрения универсальности (по типу судов), диапазона погодных параметров, простоты используемых судовых параметров и надежности получаемых результатов следует отдать предпочтение формуле (6), так как эта формула может легко быть реализована в программном алгоритме для автоматического расчета ветро-волновых потерь судна.

2. Установлена возможность уточнения формул (4), (6) по результатам замера потерь скорости в каждом рейсе в условиях воздействия конкретного ветра и волнения, а также с учетом конкретных параметров загрузки судна. Это дает возможность судоводителям, судомеханикам, судовладельцам, а также другим участникам транспортного процесса использовать уточненные формулы для расчета потерь скорости хода конкретных судов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Международная конвенция о подготовке и дипломировании моряков и несении вахты. — Лондон: ИМО, 2013. — 413 с.
2. Смоленцев О. И. Методы расчета вынужденных потерь скорости судна на встречном волнении, связанные с нормированием слеминга и заливаемости / О. И. Смоленцев // Электронный вестник. — 2011. — № 4. — С. 18–25.
3. Дмитриев В. И. Справочник капитана / В. И. Дмитриев, В. Л. Григорян, С. В. Козик [и др.]. — СПб.: Элмор, 2009. — 816 с.
4. Ершов А. А. От «Титаника» до «Costa Concordia» неиспользованные возможности для спасения: монография / А. А. Ершов. — Saarbrücken, Deutschland: LAPLAMBERT Academic Publishing, 2013. — 146 с.
5. Темникова А. А. Определение скорости ледоколов на «чистой» воде, эксплуатируемых на Северном Каспии / А. А. Темникова, А. Р. Рубан // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2017. — Т. 9. — № 1. — С. 27–36. DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-1-27-36.
6. Львов В. Е. Компенсация волнового и ветрового воздействий на систему управления курсом судна / В. Е. Львов // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2015. — № 1 (29). — С. 25–29.
7. Крюков Н. Д. Рекомендации для судов при плавании в условиях тропических штормов северной Атлантики / Н. Д. Крюков // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2015. — № 4 (32). — С. 31–38.
8. Стецюк Т. Г. К вопросу о расчетном определении падения скорости судна в штормовых условиях плавания / Т. Г. Стецюк, В. Г. Сизов // Судовождение. — 2010. — С. 22–27.
9. Лубковский В. К. Определение веторо-волновых потерь скорости судов смешанного плавания с помощью ортогонально-линейного волномера / В. К. Лубковский // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока. — 2007. — № 1. — С. 68–73.
10. Тарасенко Т. В. Определение сопротивления движению судна при движении на волнении с учетом курсового угла / Т. В. Тарасенко // Вестник Одесского национального морского института. — 2013. — С. 49–59.

REFERENCES

1. *Mezhdunarodnaya konventsiya o podgotovke i diplomirovanii moryakov i nesenii vakhty*. London: IMO, 2013.
2. Smolentsev, O. I. "Metody rascheta vynuzhdennykh poter' skorosti sudna na vstrechnom volnenii, svyazannye s normirovaniem sleminga i zalivaemosti." *Elektronnyi vestnik* 4 (2011): 18–25.
3. Dmitriev, V. I., V. L. Grigoryan, S. V. Kozik, V. A. Nikitin, L. S. Rassukovanyi, G. G. Fadeev, and Yu. V. Tsitrik. *Spravochnik kapitana*. Sankt-Peterburg: Elmor, 2009.
4. Ershov, A. A. *Ot «Titanika» do «Costa Concordia» neispol'zovannye vozmozhnosti dlya spaseniya: monografiya*. Saarbrücken, Deutschland: LAPLAMBERT Academic Publishing, 2013.
5. Temnikova, Alena A., and Anatoliy R. Ruban. "Determination of the icebreakers' speed in ice free water operated in the Northern Caspian sea." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova* 9.1 (2017): 27–36. DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-1-27-36.
6. L'vov, V. E. "Compensation of wave and wind effects on the ship's course management system." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova* 1(29) (2015): 25–29.
7. Kryukov, N. D. "Rekomendatsii dlya sudov pri plavanii v usloviyakh tropicheskikh shtormov severnoi Atlantiki." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova* 4(32) (2015): 31–38.

8. Stetsyuk, T. G., and V. G. Sizov. "K voprosu o raschetnom opredelenii padeniya skorosti sudna v shtormovykh usloviyakh plavaniya." *Sudovozhdenie* (2010): 22–27.
9. Lubkovskii, V. K. "Opredelenie vetoro-volnovykh poter' skorosti sudov smeshannogo plavaniya s pomoshch'yu ortogonal'no-lineechnogo volnomera." *Nauchnye problemy transporta Sibiri i Dal'nego Vostoka* 1 (2007): 68–73.
10. Tarasenko, T. V. "Opredelenie soprotivleniya dvizheniyu sudna pri dvizhenii na volnenii s uchetom kursovogo ugla." *Vestnik Odesskogo natsional'nogo morskogo instituta* (2013): 49–59.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

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

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, kaf_mus@gumrf.ru

Пылаев Сергей Михайлович —
кандидат педагогических наук, доцент
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени
адмирала С. О.Макарова»
198035, Российская Федерация, Санкт-Петербург,
ул. Двинская, 5/7
e-mail: kaf_fk@gumrf.ru

INFORMANION ABOUT THE AUTORS

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

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, kaf_mus@gumrf.ru

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

Статья поступила в редакцию 4 октября 2017 г.

Received: October 4, 2017.

DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-6-1175-1185

IMPROVEMENT OF OPERATIONAL SAFETY AND RELIABILITY OF PORT HYDROTECHNICAL STRUCTURES TO THE LIQUEFACTION OF SOIL BASES BY A NEW EXPLOSIVE SEALING METHOD

O. P. Minaev

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

Increase of operational safety and reliability is the most important task in the construction of port hydraulic structures. Sandy grounds are widely used to form new and expand existing areas of port hydraulic structures, including sandy backfill of city and port embankments. Liquefaction of water-saturated sandy grounds of bases is the most dangerous phenomenon for structures and buildings under technogenic dynamic impacts and earthquakes. In this connection abroad particularly in the United States and Japan is underway extensive research on the subject. The most effective way to improve the technogenic dynamic impacts and seismic safety of liquefaction soil bases and facilities is their seal. For this there are various methods of dynamic seal. However currently the use of these methods in the global construction practice is based on the developments of Russian specialists 50 ... 60-ies years of last century. Increasing the operational safety and reliability of port hydraulic structures to the liquefaction of sandy soils can be ensured by their compaction. The author of the report shows the high efficiency of the explosive method for sealing water-saturated sandy soils bases designed them a new way of consecutive blasting charges. In addition, a method consecutive blasting charges and proposed them a new method vibration isolation soil bases of construction site allows several times to reduce the magnitude of the dynamic effects on nearby buildings and weak indigenous soils.

The carried out researches have shown that the method of consecutive blasting of charges allows to increase the relative sediments of the compaction base by 30 – 40 % and to reach the degree of soil base density I_D not less than 0,6 – 0,8, which practically ensures the stability of sandy ground structure to their liquefaction in the base of buildings and structures from technogenic vibrodynamic and seismic influences. In addition, the use of the method of sequential charge blasting to compact the base soils allows a reduction of 2, 5 – 3 times the safety distances for buildings and structures. Moreover, the additional creation of a special protection in the form of a layer of aerated soil along the boundary of the base to be compacted makes it possible to almost completely eliminate the danger of technogenic vibrodynamic effects arising from the dynamic compaction of the grounds of new construction bases to nearby buildings and structures. This allows us to expand the scope of the dynamic methods of compaction of sandy water-saturated soils for the conditions of expansion of existing port hydrotechnical complexes and the presence of weak clay soils with structural strength at their base.

Keywords: safety, reliability, hydraulic structures, foundations and structures, sealing method, explosive method, vibration isolation method of construction.

For citation:

Minaev, Oleg P. "Improvement of operational safety and reliability of port hydrotechnical structures to the liquefaction of soil bases by a new explosive sealing method." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 9.6 (2017): 1175–1185. DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-6-1175-1185.

УДК 624.2:624.131.3:627.25

ПОВЫШЕНИЕ ЭКСПЛУАТАЦИОННОЙ БЕЗОПАСНОСТИ И НАДЕЖНОСТИ ПОРТОВЫХ ГИДРОТЕХНИЧЕСКИХ СООРУЖЕНИЙ ПРИ РАЗЖИЖЕНИИ ГРУНТОВ ОСНОВАНИЙ НОВЫМ ВЗРЫВНЫМ СПОСОБОМ УПЛОТНЕНИЯ

О. П. Минаев

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

Повышение эксплуатационной безопасности и надёжности является наиважнейшей задачей при строительстве портовых гидротехнических сооружений. Для образования новых и расширения су-

существующих территорий портовых гидротехнических сооружений, в том числе песчаных насыпок городских и портовых набережных широко применяются песчаные грунты. Повышение эксплуатационной безопасности и надежности портовых гидротехнических сооружений процессу разжижения песчаных грунтов может быть обеспечено их уплотнением. Показана высокая эффективность взрывного метода для уплотнения водонасыщенных песчаных грунтов оснований разработанным автором новым способом последовательного взрывания зарядов. К тому же способ последовательного взрывания зарядов и предложенный новый способ виброизоляции площадки строительства позволяют в несколько раз снизить величину динамических воздействий на близлежащие здания и сооружения, а также слабые коренные грунты в основании портовых сооружений.

Проведенные исследования показали, что способ последовательного взрывания зарядов позволяет на 30 – 40 % увеличить относительные осадки уплотняемого основания и достигнуть степени плотности грунтов основания I_D не менее 0,6 – 0,8, что практически обеспечивает устойчивость структуры песчаных грунтов их разжижению в основании зданий и сооружений, обусловленных вибродинамическими и сейсмическими воздействиями. Кроме того, применение способа последовательного взрывания зарядов для уплотнения грунтов оснований позволяет в 2,5 – 3 раза сократить безопасные расстояния для зданий и сооружений. При этом дополнительное создание специальной защиты в виде слоя из аэрированного грунта вдоль границы уплотняемого основания позволяет практически полностью ликвидировать опасность техногенных вибродинамических воздействий, возникающих при динамическом уплотнении грунтов оснований нового строительства, на близлежащие здания и сооружения. Это дает возможность расширить область применения динамических методов уплотнения песчаных водонасыщенных грунтов в условиях расширения существующих портовых гидротехнических комплексов и наличия в их основании слабых глинистых грунтов, обладающих структурной прочностью.

Ключевые слова: безопасность, надежность, гидротехнические сооружения, основания и сооружения, способ уплотнения, взрывной метод, способ виброизоляции площадки строительства.

Для цитирования:

Минаев О. П. Повышение эксплуатационной безопасности и надежности портовых гидротехнических сооружений при разжижении грунтов оснований новым взрывным способом уплотнения / О. П. Минаев // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2017. — Т. 9. — № 6. — С. 1175–1185. DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-6-1175-1185.

Введение

Повышение эксплуатационной безопасности и надёжности является важнейшей задачей при строительстве портовых гидротехнических сооружений [1] – [3]. Для образования новых и расширения существующих территорий портовых гидротехнических сооружений, в том числе насыпок городских и портовых набережных, как правило, применяются песчаные грунты. Разжижение водонасыщенных песчаных грунтов оснований является наиболее опасным явлением для сооружений и зданий при техногенных динамических воздействиях и землетрясениях. Первые детальные исследования процесса разжижения песчаных грунтов, их консолидации и динамического уплотнения взрывным методом были проведены в середине XX в. проф. П. Л. Ивановым применительно к строительству крупных плотин на песчаных основаниях [4], [5]. Данные исследования базировались на теории консолидации грунтов, созданной проф. В. А. Флориным [4].

В истории известно множество катастрофических аварий и разрушений зданий и сооружений, вызванных землетрясениями. Среди последних следует отметить землетрясение в г. Нефтегорске (о. Сахалин, Россия), когда первые два этажа жилых пятиэтажных зданий буквально «утонули» в разжиженном слое песка. В результате землетрясения г. Нефтегорск был полностью разрушен и не подлежит восстановлению.

География катастрофических и разрушительных землетрясений в мире в последние годы остаётся довольно широкой. Среди них следует выделить крупнейшее землетрясение магнитудой 9,0 баллов, которое произошло на АЭС в г. Фукусимо (Япония, 2011 г.), а также последние, произошедшие в 2010 – 2016 гг. в США, Греции, Италии, Чили, Китае, Японии и Тайване. Следует отметить, что на Японию приходится около 20 % всех землетрясений в мире магнитудой 6,0 баллов и выше. В связи с этим за рубежом, в особенности в США и Японии, ведутся масштабные исследования явления разжижения грунтов оснований и сооружений, рассмотренные в работах [6] – [11]

и других публикациях. Проведение данных исследований началось в США позднее, чем в России, проф. Н. В. Seed и было продолжено его учениками — проф. I. M. Idriss и проф. R. W. Boulanger [6] – [9].

Особой вехой в этом направлении явились исследования проф. Kenji Ishihara (Япония), которые были обобщены им в монографии «Поведение грунтов при землетрясениях» (К. Ишихара, СПб., 2006, пер. на рус. яз.) [11].

Наиболее действенным способом повышения техногенной и сейсмической безопасности и надёжности разжижению грунтов оснований и сооружений является их уплотнение [12] – [14]. Для этого имеются различные динамические методы уплотнения, однако в настоящее время их применение в зарубежной строительной практике основано на разработках российских специалистов 50- – 60-х гг. XX в.

Целью настоящей статьи является ознакомление учёных и специалистов, строителей и проектировщиков портовых гидротехнических сооружений с современными исследованиями и разработками, направленными на повышение безопасности и надёжности данных сооружений процессу разжижения грунта при статических и в особенности динамических (техногенных и сейсмических) воздействиях для предотвращения неравномерных осадок и просадок грунта, образования каверн и полостей в песчаной засыпке и в основании портовых сооружений. Тем самым могут быть предотвращены недопустимые деформации и разрушение зданий и сооружений портового комплекса, обеспечивается надёжная работа грузоподъёмных кранов, повышается устойчивость ограждающих и причальных сооружений набережных портов и т. д.

Данная цель, состоящая в недопущении катастрофического процесса разжижения грунта при эксплуатации портовых гидротехнических сооружений от динамических (волновых, фильтрационных, взрывных, сейсмических и др.) воздействий, может быть достигнута за счёт уплотнения песчаных грунтов засыпок и оснований портовых сооружений новым эффективным взрывным способом уплотнения, разработанным автором статьи [15]. Кроме того, в статье представлены исследования автора по виброизоляции площадки строительства, осуществляемой с помощью нового высокоэффективного способа защиты, практически полностью предотвращающего влияние вредных динамических воздействий, возникающих в процессе уплотнения грунтов, на существующие близлежащие здания и сооружения [16]. Также приведены результаты теоретических и экспериментальных (лабораторных и натурных) исследований практического внедрения. Данные исследования имеют научную и практическую значимость как в части развития существующих расчётных моделей, так и в части проведения уникальных лабораторных и крупномасштабных натурных экспериментальных исследований, а также получения данных практического применения в гидротехническом строительстве.

Основные результаты исследований, изложенных в данной статье, были освещены автором на пленарном докладе XII Российской национальной конференции по сейсмическому строительству и сейсмическому районированию (с международным участием), состоявшейся 12 – 16 сентября 2017 г. в г. Ялте Республики Крым, а также частично были представлены на XIX Международном конгрессе по механике грунтов и инженерной геологии в г. Сеуле, Южная Корея (17 – 22 сентября 2017 г.).

Методы и материалы исследований

В процессе теоретических исследований была рассмотрена задача о взрыве зарядов, размещённых в одном ярусе по глубине и на определенном расстоянии в плане в пределах уплотняемого участка основания с заданным интервалом времени, в том числе в стадии частичной консолидации грунта основания от взрыва предыдущего заряда.

Для характеристики напряженного состояния «скелета» грунта основания и действия ударной волны с учётом дополнительного воздействия фильтрационных сил было предложено соотношение

$$\Delta = \frac{\sigma(p_{\max}) + \sigma(\Phi)}{\sigma(\gamma_{\text{гр}})}, \quad (1)$$

где $\sigma(p_{\max})$ — максимальные давления ударной волны воздействия взрыва, передающиеся на скелет грунта основания; $\sigma(\Phi)$ — фильтрационные напряжения в грунтах основания в стадии частичного разжижения грунта от взрыва предыдущего заряда.

В случае отсутствия защемленного газа в грунте основания по В. А. Флорину

$$\sigma(p_{\max}) = \frac{(\beta_{\text{т}} m + \beta_{\text{в}} n) p_{\max}}{(\beta_{\text{т}} m + \beta_{\text{в}} n + \beta_{\text{ск}})}, \quad (2)$$

где $m = 1 - n$; $\beta_{\text{т}}$, $\beta_{\text{в}}$, $\beta_{\text{ск}}$ — соответственно коэффициенты объемной сжимаемости твердых минеральных частиц, воды и скелета грунта основания.

Для водонасыщенных песков с незначительным содержанием в них защемленного газа по данным Г. М. Ляхова зависимость для максимального давления ударной волны в грунтах основания имеет вид

$$p_{\max} = 60,0 \left(\frac{3\sqrt{C}}{R} \right)^{1,05}, \quad (3)$$

где $p_{\max}$ — максимальное давление, МПа; C — масса заряда, кг; R — расстояние от центра заряда, м.

Вертикальные напряжения в скелете грунта основания на глубине с учетом взвешивающего действия воды определяются в виде

$$\sigma(\gamma_{\text{гр}}) = (\gamma_{\text{с}} - \gamma_{\text{в}})(1 - n)z, \quad (4)$$

где $\gamma_{\text{с}}$, $\gamma_{\text{в}}$ — удельный вес частиц грунта и воды; n — пористость грунта; z — глубина, м.

По результатам опытных взрывов глубинных зарядов в водонасыщенных мелких песках основания значение Δ (см. формулу (1)) может быть принято при рыхлом их сложении равным 5 – 15 и при средней плотности сложения — 15 – 30.

По зависимости В. А. Флорина время уплотнения $t_{\text{уп}}$ слоя грунта основания может быть определено по формуле

$$t_{\text{уп}} = \frac{\gamma_{\text{в}}}{\gamma_{\text{вз}}} \frac{h_{\text{уп}}}{K_{\text{ф}}} \frac{n_1 - n_2}{1 - n_1}, \quad (5)$$

где $\gamma_{\text{в}}$ — удельный вес воды; $\gamma_{\text{вз}}$ — удельный вес взвешенного в воде грунта; $h_{\text{уп}}$ — мощность уплотняемого слоя грунта основания; $K_{\text{ф}}$ — коэффициент фильтрации уплотняемого грунта; n_1 , n_2 — соответственно начальная пористость грунта и пористость грунта после этапа уплотнения.

Для ориентировочной оценки безопасного расстояния, на котором колебания грунта, вызываемого однократным взрывом сосредоточенного заряда взрывчатых веществ (ВВ) заданной массы, становятся безопасными для обычных зданий и сооружений на водонасыщенных грунтах, использовалась известная зависимость [17].

В более строгих расчётах применялись формулы для определения максимального давления $p_{\max}$ фронта ударной волны при незначительном содержании воздуха, а при наличии специальной защитного слоя грунта вдоль границы уплотняемого основания — для максимального давления $p_{\max}$ фронта ударной волны при содержании воздуха 4 – 5 % с учётом коэффициента отражения $K_{\text{отр}}$ волн на границе сопряженных участков линейно-упругих сред с различным динамическим сопротивлением. Расчетная схема характера затухания ударных волн деформаций при взрыве глубинных зарядов в обычном грунте и при наличии слоя аэрированного грунта представлена на рис. 1.

В соответствии с источником библиографии [5] максимальное давление $p_{\max}$ фронта ударной волны при содержании воздуха 4 – 5 % определяется по зависимости

$$p_{\max} = 4,5 \left(\frac{3\sqrt{C}}{R} \right)^{2,5}, \quad (6)$$

где $p_{\max}$ — максимальное давление, МПа; C — масса заряда ВВ, кг; R — расстояние от центра заряда, м.

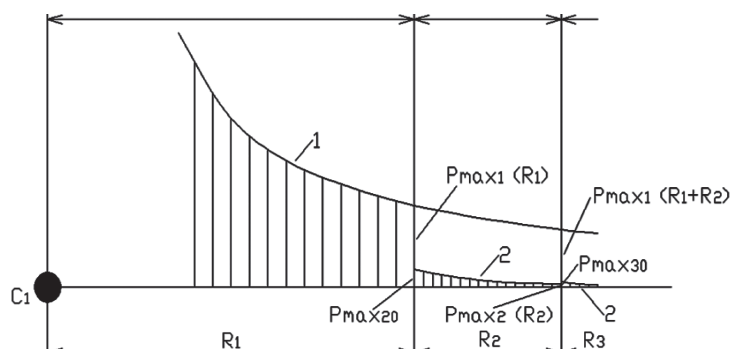


Рис. 1. Характер затухания максимальной ударной волны деформации от взрыва заряда в грунте обычном 1 и при наличии аэрированного виброзащитного слоя 2

Согласно [18], коэффициент отражения $K_{\text{отр}}$ волн на границе сопряженных участков линейно-упругих сред с различным динамическим сопротивлением определяется по выражению

$$K_{\text{отр}} = \frac{2a_2}{a_1 + a_2}, \quad (7)$$

где $a = \gamma \cdot c / g$ — динамическое сопротивление рассматриваемого участка основания (γ и c — соответственно удельный вес грунта основания и скорость распространения волн; g — ускорение свободного падения).

Для проведения контрольных натурных исследований были выбраны два рядом расположенных участка основания на строительстве Комплекса защитных сооружений г. Санкт-Петербурга от наводнений. На первой площадке основания производилось одновременное взрывание всех зарядов в каждой из четырех очередей, а на второй — последовательное. Таким образом, на первой площадке одновременно было взорвано шестнадцать зарядов, на второй площадке основания каждый заряд в очереди взрывался отдельно в местах погружения зарядов (рис. 2). Разрыв между взрывами отдельных зарядов составлял 3 – 5 мин (в отдельных случаях — до 10 мин).

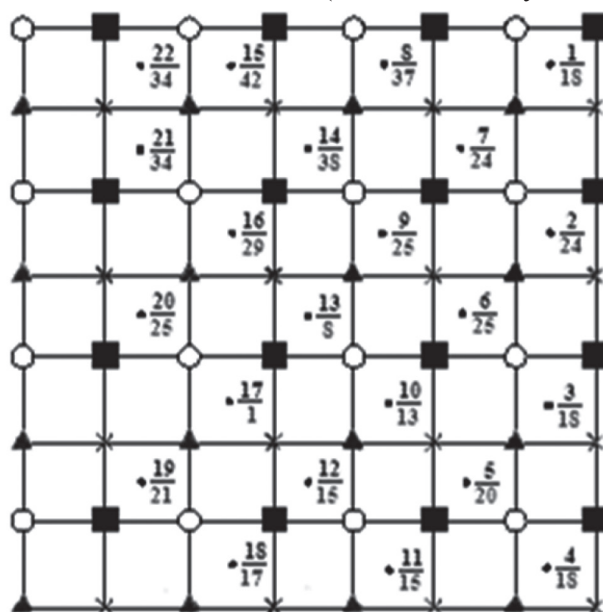


Рис. 2. План опытного участка уплотнения грунта основания последовательным взрыванием зарядов

Условные обозначения:

○ — заряды 1-й очереди; □ — заряды 2-й очереди; × — заряды 3-й очереди;

▲ — заряды 4-й очереди; в числителе дроби — порядковые номера поверхностных марок;

в знаменателе — суммарная осадка грунта поверхности основания после четырех очередей взрывов в см

Основной целью экспериментальных лабораторных исследований являлось выявление возможности создаваемой стенки из аэрированного грунта отражать упругие волны деформаций и количественно определить её влияние на параметры возбуждаемых колебаний при динамическом воздействии на водонасыщенные грунты основания. Экспериментальные исследования проводились на лабораторном стенде, на котором был установлен бак, куда укладывался водонасыщенный грунт для исследований. Динамическое воздействие осуществлялось сбрасываемым грузом по направляющей на поверхность уложенного в баке грунта. Для измерения колебаний грунта применялись датчики ускорения, установленные по длине бака.

Результаты исследований

Результаты расчётов показали, что при последовательном взрыве двух зарядов с интервалом $\Delta t \geq t_{\text{уп1}}$, где $t_{\text{уп1}}$ — время уплотнения разжиженного слоя $h_{\text{уп1}}$ грунта основания от взрыва первого заряда в нижней части, в промежутках между зарядами существует значительная «мертвая зона», не подверженная полному разжижению грунта.

В процессе консолидации грунта граница r_1 разжиженного слоя грунта перемещается к поверхности, и процесс полностью заканчивается при $r_1 = h_{\text{уп1}}$. При этом последующий взрыв рядом расположенного заряда с интервалом времени $\Delta t < t_{\text{уп1}}$ позволяет не только обеспечить разжижение грунта в этой неразжиженной зоне, но и повторно воздействовать на грунты основания, подверженные воздействию предыдущего заряда (рис. 3). Данное обстоятельство приводит к многократному разжижению грунта в промежутках между зарядами, повторяющимися при последующих очередях взрывов. При этом ослабление структуры массива грунта основания за счет развития фильтрационных сил в процессе консолидации от взрыва предыдущего заряда способствует запасу эффективности воздействия взрыва последующего заряда.

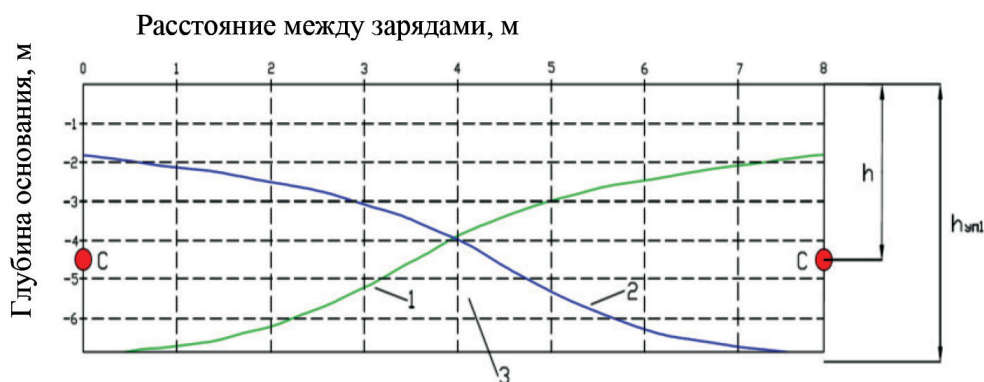


Рис. 3. Графики зависимости глубины разжижения грунта от центра взрыва зарядов при последовательном взрыве двух рядом расположенных зарядов с интервалом времени $\Delta t \geq t_{\text{уп1}}$:

1, 2 — зоны разжижения грунта от взрыва первого и второго заряда соответственно;
3 — «мертвая зона», не подверженная разжижению грунта основания

Аналогичные расчеты для одновременного взрыва двух рядом расположенных зарядов (рис. 4) свидетельствуют о том, что в данном случае может быть практически ликвидирована «мертвая зона» грунтов основания ненарушенной структуры между соседними зарядами за счет усиления встречных ударных волн деформаций при их наложении. Однако при этом не может быть получен эффект повторного разрушения структуры грунта основания от взрыва последующего заряда. По данным [5], [18], скорость распространения волн при незначительном содержании воздуха в водонасыщенном песчаном грунте основания составляет 1600 м/с, а при содержании воздуха 4 % снижается до 200 м/с. Принимая $\gamma_1 = \gamma_3 \approx \gamma_2$ в выражении (7), вычислим для сопряженных участков 1 – 2 и 2 – 3, соответственно, $K_{\text{отр1}} = 0,22$ и $K_{\text{отр2}} = 1,78$. Отсюда полученные числовые значения позволили ожидать при экспериментальных исследованиях снижение амплитуд колебаний грунта за границей зоны аэрирования в 2,5 – 3 раза.

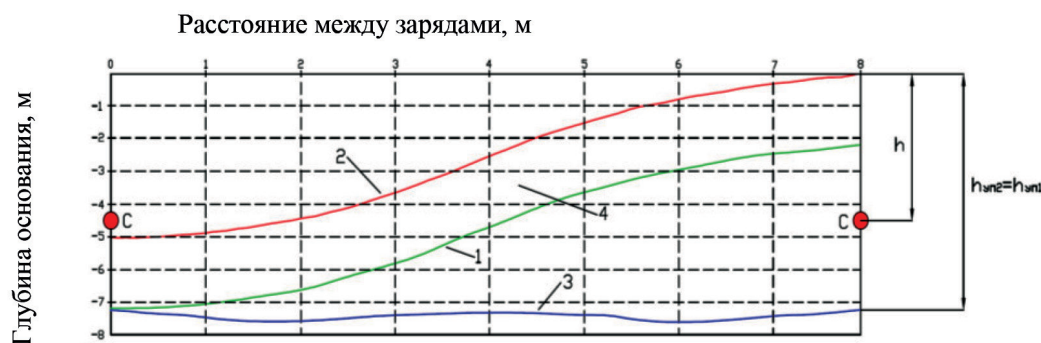


Рис. 4. Графики зависимости глубины разжижения грунта от расстояния от центра взрыва зарядов при последовательном взрыве двух рядом расположенных зарядов с интервалом времени $\Delta t \leq t_{\text{уп}}$

- 1 — зона разжижения грунта от взрыва первого заряда;
2 — зона разжижения грунта в процессе консолидации грунта за время Δt после взрыва первого заряда;
3 — зона разжижения грунта от взрыва второго заряда с интервалом $\Delta t = 0,3t_{\text{уп}}$;
4 — зона повторного разжижения грунта основания

Для стандартного заряда массой 5 кг и радиуса эффективного действия заряда 5 м по формуле (3) было найдено, что давление в падающей ударной волне p_{max1} ($R_1 = 5$ м) на внутренней границе аэрированного слоя равно 19,45 МПа. При этом с учетом коэффициента отражения волн $K_{\text{отр1}}$ на границе с более сжимаемой средой давление в проходящей ударной волне p_{max20} на границе участков 1 – 2 составило 4,28 МПа.

Далее по зависимости (6) было найдено максимальное давление фронта в проходящей ударной волне на внешней границе аэрированного слоя p_{max30} , т. е. на границе сопряженных участков 2 – 3. С учетом коэффициента отражения $K_{\text{отр2}}$ от границы сопряженных участков 2 – 3 данные значения были равными 1346 кН/м² и 488 кН/м² для аэрированного слоя грунта толщиной 2 и 3 м соответственно. Аналогично для обычного грунта максимальное давление фронта ударной волны, вычисленное по формуле (3) для расстояний $R_1 + R_2$ от взрыва ВВ, равных 7 и 8 м, составило, соответственно, 13,7 и 11,9 МПа. Отсюда было определено, что максимальное давление фронта ударной волны на грунты основания снижается при наличии стенки из аэрированного грунта по периметру уплотняемого основания в 10 – 24 раза.

Геодезические измерения осадок поверхности основания показали, что величина относительной осадки на площадке последовательного взрывания после четырех очередей составила 0,052, одновременного — 0,039 для средних осадок на уплотняемом основании и 0,091 и 0,065 для максимальных осадок. Весьма убедительными явились результаты статического зондирования основания. На первой площадке сопротивление внедрению острия зонда изменилось лишь на 4 – 6 МПа, а на площадке последовательного взрывания оно увеличилось с 2 МПа до 10 – 16 МПа, что свидетельствует о значительном уплотнении грунта основания (рис. 5).

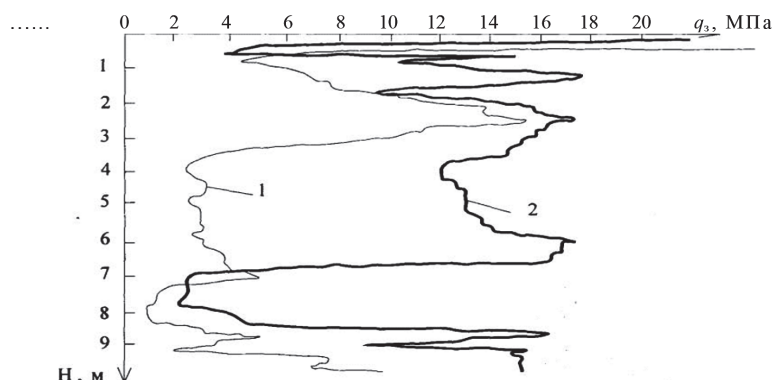


Рис. 5. Графики зависимости сопротивления q_z внедрению острия зонда от глубины H его погружения в грунты основания по результатам статического зондирования песчаного грунта при последовательном взрывании зарядов: 1 — до взрыва; 2 — после взрыва всех зарядов

В проведенных лабораторных экспериментах было получено снижение амплитуд смещений поверхностного слоя водонасыщенного грунта, находящегося за пределами сечения, в котором осуществлялось аэрирование грунта, в 2 – 3 раза, что полностью согласуется с расчётными данными отражения волн деформаций без учёта их поглощения в аэрированном грунте защитного слоя грунтов основания на границе уплотнения (рис. 6). В пересчете на снижение амплитуд колебаний, полученных при учёте затухания волн деформаций в аэрированном слое грунта для средней частоты колебаний грунта основания, равной 25 Гц, зафиксированной в лабораторных опытах, что будет составлять уменьшение ускорений колебаний за аэрированным слоем в 6 – 15 раз. Это практически полностью исключает вредные техногенные вибродинамические воздействия на близлежащие здания и сооружения [19], [20].

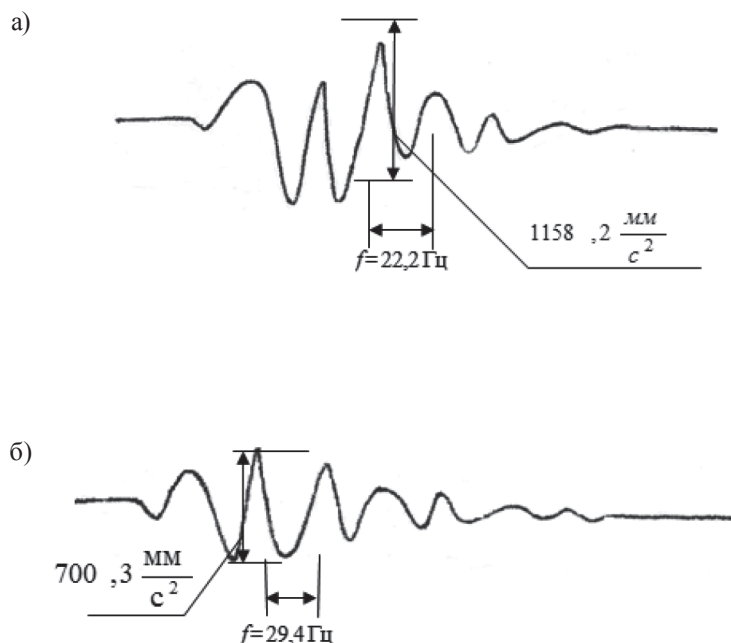


Рис. 6. Осциллограммы ускорений колебаний, зафиксированные датчиками ускорений колебаний до (а) и после (б) аэрированного слоя грунта

Опытное апробирование защиты близлежащих зданий от вибродинамического воздействия было впервые выполнено по предложению проф. О. А. Савинова для защиты жилого здания от интенсивной вибрации, вызываемой колебаниями рельсовых путей железнодорожного транспорта при прохождении поездов. Основой для этого предложения явились разработки проф. И. С. Шейнина и проф. О. А. Савинова во ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева по защите верхнего бьефа гидротехнической плотины от сейсмического воздействия с помощью воздушной завесы [21]. Вынужденные колебания жилого здания были настолько интенсивными, что нарушали санитарные нормы проживания в нём людей, которые обращались с многочисленными жалобами в различные инстанции, вплоть до руководства страны. Для реализации данного предложения было выполнено периодическое вибропогружение штанги с консолями в нижней части с верхними отверстиями для воздухоматирования водонасыщенного грунта вдоль границы между рельсовыми путями и жилым зданием. После этого вибрация здания фактически прекратилась. К сожалению, никаких специальных исследований, в том числе измерений параметров колебаний грунтов оснований и конструкций данного здания, в этом случае не велось.

Следует отметить, что результаты статического зондирования, проведенные до и после выполнения процесса воздухоматирования, показали очень значительное уплотнение грунта в промежутке между рельсовыми путями и зоной воздухоматирования. В результате многократного уплотнения за счет отражения волны деформаций от воздухоматерирующей завесы грунт между ней

и рельсовыми путями уплотнился настолько, что фактически стал выполнять функцию отражателя волн деформации, вызванных колебаниями подвижного состава, по границе подверженного воздухонасыщению грунта. Данное заключение свидетельствует о том, что после возможной ликвидации воздушной завесы вследствие многократного вибродинамического воздействия при прохождении поездов по рельсовым путям эффект виброизоляции здания сохраняется. С высокой вероятностью представляется, что данным способом могут успешно решаться задачи по вибродинамической и сейсмической безопасности зданий и сооружений в портовом гидротехническом строительстве.

Заключение

1. Повышение эксплуатационной безопасности и надежности портовых гидротехнических сооружений процессу разжижения песчаных грунтов при образовании новых и расширения существующих территорий, в том числе песчаных насыпок городских и портовых набережных, может быть обеспечено уплотнением грунтов оснований и сооружений.

2. В настоящее время в России разработаны принципиально новые способы уплотнения и виброизоляции грунтов оснований, позволяющие наряду с достижением более высокой плотности грунтов оснований обеспечить существенное снижение влияния вредных вибродинамических воздействий на близлежащие здания и коренные грунты основания. Последнее позволяет расширить область применения динамических методов уплотнения песчаных водонасыщенных грунтов для расширения существующих портовых гидротехнических комплексов при наличии в их основании слабых глинистых грунтов, обладающих структурной прочностью.

3. Как показали проведенные исследования, способ последовательного взрывания зарядов позволяет на 30 – 40 % увеличить относительные осадки уплотняемого основания и достигнуть степени плотности грунтов основания I_D не менее 0,6 – 0,8, что практически обеспечивает устойчивость структуры песчаных грунтов их разжижению в основании зданий и сооружений от техногенных вибродинамических и сейсмических воздействий.

4. Кроме того, применение способа последовательного взрывания зарядов для уплотнения грунтов оснований позволяет в 2,5 – 3 раза сократить безопасные расстояния для зданий и сооружений. При этом дополнительное создание специальной защиты в виде слоя из аэрированного грунта вдоль границы уплотняемого основания позволяет практически полностью ликвидировать опасность техногенных вибродинамических воздействий, возникающих при динамическом уплотнении грунтов оснований нового строительства, на близлежащие здания и сооружения.

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.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Евтушенко Г. Н. Северные порты России / Г. Н. Евтушенко, М. А. Колосов, А. В. Силин, Р. М. Нарбут. — 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 [и др.]. — 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 5th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering. — 1961. — Vol. 1. — Pp. 107–111.

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 / H. B. Seed, I. M. Idriss. — USA, Oakland, C.A.: Earthquake Engineering Research Institute, 1982. — 134 p.
8. Idriss I. M. Soil liquefaction during earthquakes / I. M. Idriss, R. W. Boulanger. — USA, California: Earthquake Engineering Research Institute, 2008. — 262 p.
9. Ishihara K. Soil Behaviour in Earthquake Geotechnic / K. Ishihara. — Oxford University Press, 1996. — 360 p.
10. 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.
11. Towhata I. On ageing of liquefaction resistance of sand Russian methods and equipment for spatial vibro-compaction foundations and structures / I. Towhata, S. Goto, Y. Taguchi, T. Hayashida, Y. Shintaku, Y. Hamada // Japanese Geotechnical Society Special Publication. — 2016. — Vol. 2 (2015). — No. 21. — Pp. 800–805. DOI: 10.3208/jgssp.JPN-072.
12. Минаев О. П. Разработка динамических методов глубинного уплотнения слабосвязанных грунтов оснований / О. П. Минаев // Основания, фундаменты и механика грунтов. — 2013. — № 6. — С. 21–23.
13. Minaev O. P. Russian methods and equipment for spatial vibrocompaction foundations and structures / O. P. Minaev // Japanese Geotechnical Society Special Publication. — 2016. — Vol. 2 (2015). — No. 80. — Pp. 2747–2750. DOI: 10.3208/jgssp.TC305-11.
14. Minaev O. P. Significant Development of Explosive Compaction Method for Sandy Foundations / O. P. Minaev // Proceedings of the 19th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering. — Seoul, Korea, 2017. — Pp. 2591–2594.
15. Пат. 2060320 Российская Федерация, МПК E02D 3/10. Способ уплотнения слабосвязных грунтов взрывами / О. П. Минаев, А. П. Крутов; заяв. и патентообл. АО открытого типа «Всероссийский государственный научно-исследовательский институт гидротехники им. Б. Е. Веденеева». — № 93 93011922; заявл. 05.03.1993; опубл. 20.05.1996.
16. Пат. 1770526 Российская Федерация, МПК E02D 3/10. Способ уплотнения грунта / О. П. Минаев, О. А. Савинов, Ю. К. Севенард, П. Л. Иванов; заяв. и патентообл. Производственное строительно-монтажное объединение «Ленгидроэнергоспецстрой», Всесоюзный научно-исследовательский институт гидротехники им. Б. Е. Веденеева. — № 90 4791452; заявл. 23.02.1990; опубл. 23.10.1992.
17. Рекомендации по оценке устойчивости гидротехнических сооружений из грунтовых материалов при сейсмозрывных и эксплуатационных динамических воздействиях: П 29-86/ВНИИГ. — Л., 1986. — 44 с.
18. Ляхов Г. М. Волны в плотных средах и нагрузки на сооружения / Г. М. Ляхов, Н. И. Полякова. — М.: Недра, 1967. — 232 с.
19. Ставницер Л. Р. Сейсмостойкость оснований и фундаментов: монография / Л. Р. Ставницер. — М.: Изд-во Ассоциации Строительных вузов, 2010. — 448 с.
20. Уздин А. М. Об эффективности применения экранов в грунте для сейсмозащиты зданий и сооружений / А. М. Уздин, М. В. Фрезе // Основания, фундаменты и механика грунтов. — 2011. — № 1. — С. 17–19.
21. Динамика гидросооружений ГЭС / Науч. ред. д-р техн. наук И. С. Шейнин. — Л.: Изд-во «Энергия», Ленингр. отд., 1970. — 285 с.

REFERENCES

1. Evtushenko, G. N., M. A. Kolosov, A. V. Silin, and R. M. Narbut. *Severnye porty Rossii*. SPb: Gidrometeoizdat, 2006.
2. Budin, A. Ya. *Gorodskie i portovye naberezhnye*. SPb.: Izd-vo Politekhnik, 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., et al. *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 5th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*. Vol. 1. 1961. Pp. 107–111.
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*. USA, Oakland, C.A.: Earthquake Engineering Research Institute, 1982.
8. Idriss, I. M., and R. W. Boulanger. *Soil liquefaction during earthquakes*. USA, California: Earthquake Engineering Research Institute, 2008.
9. Ishihara, K. *Soil Behaviour in Earthquake Geotechnic*. Oxford University Press, 1996.
10. 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.
11. Towhata, Ikuo, Shigeru Goto, Yuichi Taguchi, Toshihiko Hayashida, Yuki Shintaku, and Yuki Hamada. "On ageing of liquefaction resistance of sand Russian methods and equipment for spatial vibrocompaction foundations and structures." *Japanese Geotechnical Society Special Publication 2*(2015) (2016): 800–805. DOI: 10.3208/jgssp.JPN-072.
12. Minaev, O. P. "Development of dynamic methods for deep compaction of slightly cohesive bed soils." *Soil Mechanics and Foundation Engineering* 6 (2013): 21–23.
13. 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.
14. Minaev, O. P. "Significant Development of Explosive Compaction Method for Sandy Foundations." *Proceedings of the 19th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering*. Seoul, Korea, 2017: 2591–2594.
15. Minaev, O.P., and A.P. Krutov. RU 2 060 320 C1, IPC E 02 D 3/10. Sposob uplotneniya slabosvyaznykh gruntov vzryvami. Russian Federation, assignee. Publ. 20 May 1996.
16. Minaev, O.P., O.A. Savinov, Yu.K. Sevenard, and P.L. Ivanov. RU 1 770 526 A1, IPC E 02 D 3/10. Russian Federation, assignee. Publ. 23 Oct. 1992.
17. *Rekomendatsii po otsenke ustoichivosti gidrotekhnicheskikh sooruzhenii iz gruntovykh materialov pri seismovzryvnykh i ekspluatatsionnykh dinamicheskikh vozdviizhiyakh: P 29–86/VNIIG*. L., 1986.
18. Lyakhov, G.M., and N.I. Polyakova. *Volny v plotnykh sredakh i nagruzki na sooruzheniya*. M.: Nedra, 1967.
19. Stavnitser, L.R. *Ceismostoikost' osnovanii i fundamentov: monografiya*. M.: Izdatel'stvo Assotsiatsii Stroitel'nykh vuzov, 2010.
20. Uzdin, A.M., and M.V. Freze. "Effectiveness of ground shields as seismic protection for buildings and structures." *Soil Mechanics and Foundation Engineering* 48.1 (2011): 24–27. DOI: 10.1007/s11204-011-9123-y.
21. Sheinin, I.S., ed. *Dinamika gidrosooruzhenii GES*. L.: Izd-vo Energiya, Leningr. otd-nie, 1970.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Минаев Олег Петрович —
кандидат технических наук
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени
адмирала С. О. Макарова»
198035, Российская Федерация, Санкт-Петербург,
ул. Двинская, 5/7
e-mail: minaev.op@bk.ru, kaf_port@gumrf.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Minaev, Oleg P. —
PhD
Admiral Makarov State University of Maritime
and Inland Shipping
5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg, 198035,
Russian Federation
e-mail: minaev.op@bk.ru, kaf_port@gumrf.ru

Статья поступила в редакцию 14 октября 2017 г.
Received: October 14, 2017.

OPTIMIZATION OF THE MOTION RIVER VESSELS REGIMES CONTROL**O. V. Soliakov¹, A. A. Potemkin¹, N. V. Pershin²**¹ — Russian University of Transport (MIIT), Moscow, Russian Federation² — Public Joint Stock Company Gazprom, St. Petersburg, Russian Federation

The article considers questions of management of the movement of river vessels. The analysis of the structures of automatic control vessel traffic systems (VTS) is carried out. The main tasks are shown for the organization of the control modes. For the task of optimal control presents a general solution that determines the minimum weighted sum mean squared error and control signals VTS. It is shown that the most important model of the yaw of the vessel in which the state vector includes three variable parameters: the yaw angle, yaw rate, drift angle. Presents the general solution of the related tasks of integration of different measuring systems and produce the necessary control signals of a vessel in conditions of wind and wave disturbances. It is established that the occurrence of any additional sources of information about the position of the vessel, and the use of a variety of thrusters does not change the basic mathematical relationships, but the basic formulas can be written for the solution of optimal control task in discrete time, corresponding to the modern methods of collecting and processing the information using the on-board computer. The possibility of creation of automatic system of VTS, which are designed not only to provide the ship's course, but also for dynamic positioning in the presence of significant wind and wave disturbances. Presented that in VTS with feedback mode included: object control (ship), the sensors of kinematic parameters of movement and control, a local control system of the executive bodies system to retrieve information matrices of the errors on the components of the state vector, including ship radar station (radar), gyro compass, hydro acoustic station, reception indicators satellite navigation system and radio-navigation systems, display system information and computing device, forming together with the manual controls remote control for movement. It is established that the state of the vessel changes under the influence of external wind and wave perturbations and control actions providing motion. It is shown that computing device performs the following tasks: estimation of the state vector, which includes the kinematic parameters of the appropriate control mode based on the most informative observations for a given component of the motion vectors; generating control signals taking into account assessments of the state and the state of the vessel based on the requirement of maximizing the measurement of the performance of VTS.

Keywords: traffic management, optimization, vessel, wind and wave disturbance, onboard computer.

For citation:

Soliakov, Oleg V., Andrey A. Potemkin, and Nikita V. Pershin. "Optimization of the motion river vessels regimes control." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 9.6 (2017): 1186–1196. DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-6-1186-1196.

УДК: 621.37**ОПТИМИЗАЦИЯ РЕЖИМОВ УПРАВЛЕНИЯ ДВИЖЕНИЕМ РЕЧНЫХ СУДОВ****О. В. Соляков¹, А. А. Потемкин¹, Н. В. Першин²**¹ — ФГБОУ ВО «Российский университет транспорта (МИИТ)», Москва, Российская Федерация² — Публичное акционерное общество «Газпром», Санкт-Петербург, Российская Федерация

В статье рассмотрены вопросы управления движением речных судов. Выполнен анализ структур автоматических систем управления движением судном (СУДС). Показаны основные задачи, требующие решения для организации режимов управления. Для задачи оптимального управления представлено общее решение, определяющее минимум взвешенной суммы среднеквадратичной ошибки и управляющих сигналов СУДС. Показано, что наиболее важной является модель рыскания судна, в которой вектор состояния включает три переменных параметра: угол рыскания, угловую скорость рыскания, угол дрейфа. Представлено общее решение связанных между собой задач комплексирования различных измерительных систем

и выработки необходимых сигналов управления судном в условиях ветровых и волновых возмущений. Установлено, что появление каких-либо дополнительных источников информации о положении судна, а также использование разнообразных подруливающих устройств не приводит к изменению основных математических соотношений, а основные формулы могут быть записаны для решения задачи оптимального управления в дискретном времени, соответствующей современным способам сбора и переработки информации с помощью бортового вычислителя. Показана возможность создания автоматических СУДС, которые предназначены не только для обеспечения курса судна, но и для динамического позиционирования при наличии значительных ветровых и волновых возмущений. Представлено, что в СУДС с обратной связью входят: объект управления (судно), датчики кинематических параметров движения и управляющих воздействий, локальная система управления исполнительными органами, системы извлечения информации с матрицами ошибок о компонентах вектора состояния, включающие судовую радиолокационную станцию, гироскоп, гидроакустическую станцию, индикаторы приема спутниковой навигационной системы и радионавигационных систем, система отображения информации и вычислительное устройство, образующие вместе с органами ручного управления пульт управления движением. Установлено, что состояние судна меняется под воздействием внешних ветровых и волновых возмущений и управляющих воздействий, обеспечивающих движение. Показано, что вычислительные устройства осуществляют решение следующих задач: оценка вектора состояния, в который входят кинематические параметры соответствующего режима управления на основе наблюдения наиболее информативных для данного движения компонент векторов; формирование управляющих сигналов с учетом оценок состояния и состояния судна, исходя из требования максимизации показателя качества работы СУДС.

Ключевые слова: управление движением, оптимизация, судно, ветровые и волновые возмущения, бортовой вычислитель.

Для цитирования:

Соляков О. В. Оптимизация режимов управления движением речных судов / О. В. Соляков, А. А. Потемкин, Н. В. Першин // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2017. — Т. 9. — № 6. — С. 1186–1196. DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-6-1186-1196.

Введение

Известно, что движение судна по внутренним водным путям происходит в самых разнообразных и постоянно изменяющихся путевых и гидрометеорологических условиях, к которым относятся ширина и извилистость фарватера, течения разных направлений и интенсивности, ограничения по глубине акватории, разнообразные по направлению и силе ветра, различная загрузка самого судна, а также путевые ограничения, рассмотренные в работе [1]. Как показывает практика эксплуатации речных судов, для каждого из сочетаний этих условий характерны свои целесообразные режимы движения судна и, следовательно, параметры работы его энергетической установки. При этом целесообразные режимы работы судового комплекса могут значительно отличаться от номинальных. Одновременно наблюдается резкое снижение нагрузки на судовые двигатели, что приводит к существенной экономии топлива, а также снижению вредных выбросов и сбросов в окружающую среду согласно исследованиям, выполненным в работе [2].

Судоводитель не в состоянии оперативно реагировать на постоянное и трудно прогнозируемое изменение условий движения судна, так как количество параметров, подлежащих одновременному учёту, достаточно велико, а следовательно, реальные режимы движения речных судов в настоящее время далеки от оптимальных. Поэтому проблема оптимизации режимов управления движением речных судов в зависимости от постоянно изменяющихся условий является весьма актуальной и серьёзной. При этом оптимизация режимов работы управления движением судов связана не только со снижением нагрузок на судовые двигатели, экономией их моторесурса и расхода топлива, но и заметным, целесообразным снижением траекторий движения, что является достоинством такого подхода согласно исследованиям [3], [4].

При управлении движением речных судов необходимо двигаться по заданной траектории или менять направление движения вполне определённым образом, отвечающим намерениям судоводителя. Свойство управляемости является одним из главных факторов, определяющих эффективность эксплуатации и безопасность плавания в условиях изменяющегося судового хода. Осо-

бые требования предъявляются к управлению движением судов, эксплуатируемых на внутренних водных путях, где требуется обеспечить высокий уровень безопасности при движении по узким и извилистым фарватерам, на мелководье, в условиях сильных течений и существенных ветровых воздействий, что отражено в работах [5], [6].

Сложность динамических процессов управления судном требует создания информационного обеспечения, позволяющего на качественно новом уровне, с использованием современных компьютерных технологий, решать задачи оптимизации технологических процессов управления сложным динамическим объектом, моделировать поведение судна в сложившихся путевых условиях с целью обеспечения безопасности и безаварийности плавания, использовать при управлении движением речных судов автоматизацию движения судна по заданному маршруту, динамическое позиционирование судна, а также глобальные навигационные спутниковые системы (ГНСС) ГЛОНАСС, GPS. Подробно преимущества и недостатки показаны в работе [1]. Поэтому задача исследования и разработки автоматических систем управления движением судном (СУДС), которые предназначены не только для обеспечения курса судна, но и для динамического позиционирования при наличии значительных ветровых и волновых возмущений, является весьма актуальной.

Методы и материалы

В СУДС (рис. 1) с обратной связью по наблюдаемым переменным $\bar{y}_1(t)$, $\bar{y}_2(t)$ входят, согласно данным источников [1], [3], следующие элементы:

- объект управления (ОУ) (судно), описываемый вектором состояния $\bar{x}(t)$;
- датчики кинематических параметров движения и управляющих воздействий, осуществляющие оценку части составляющих вектора состояния $x(t)$ на основе сигналов $\bar{y}_1(t)$;
- локальная система управления (ЛСУ) исполнительными органами (ИО);
- системы извлечения информации $\bar{y}_2(t)$ с матрицами ошибок $R_2(t)$ о компонентах вектора состояния, включающие судовую радиолокационную станцию (РЛС), гирокомпас (ГК), гидроакустическую станцию (ГАС), индикаторы приема программы методики испытаний (ПМИ) спутниковой навигационной системы (СНС) и радионавигационных систем (РНС) [1], [3];
- система отображения информации (СОИ) и вычислительное устройство (ВУ), образующие вместе с органами ручного управления пульт управления движением (ПУД).

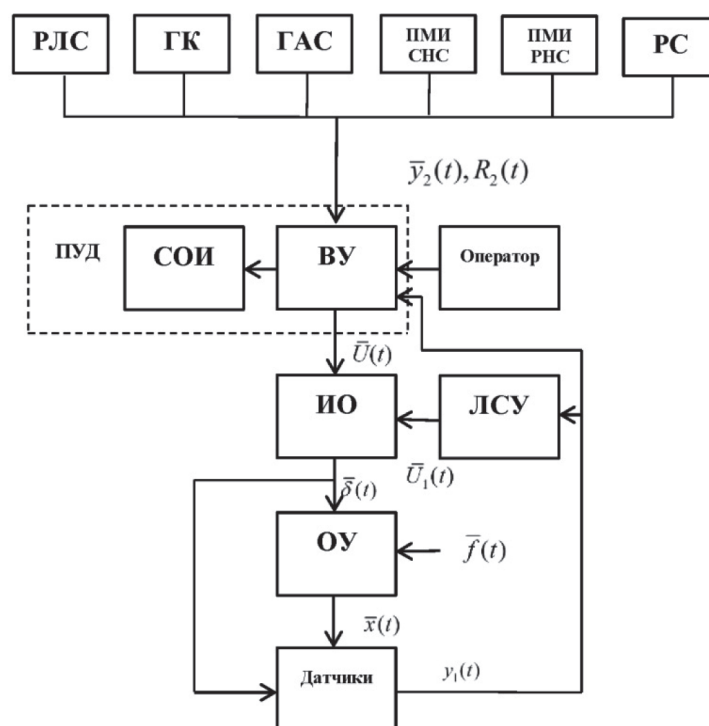


Рис. 1. Структурная схема СУДС

Состояние ОУ $x(t)$ меняется под воздействием внешних ветро-волновых возмущений $\bar{f}(t)$ и управляющих воздействий $\delta(t)$, обеспечивающих движение.

Вычислительное устройство (ВУ) осуществляет решение следующих задач:

- оценку вектора состояния, в который входят кинематические параметры соответствующего режима управления на основе наблюдения наиболее информативных для данного движения компонент векторов $\bar{y}_1(t), \bar{y}_2(t)$;
- формирование управляющих сигналов с учетом оценок $\hat{x}(t)$ состояния $\bar{x}(t)$ и состояния ОУ, исходя из требования максимизации показателя качества работы СУДС.

Метод решения

Для задачи оптимального управления общее решение, определяющее минимум взвешенной суммы среднеквадратичной ошибки и управляющих сигналов, описано и представлено в работе [4]:

$$J = M\{\bar{x}(t_f)^T S \bar{x}(t_f)\} + \int_{t_0}^{t_f} (\bar{x}^T(\tau) Q_1 \bar{x}(\tau) + \bar{U}^T(\tau) R_1 \bar{U}(\tau)) d\tau,$$

где S, Q_1, Q_2 — весовые матрицы, симметричные и неотрицательно определенные.
Вектор наблюдений:

$$\bar{y}(t) = C(t) \cdot x(t) + \bar{V}(t), \quad (1)$$

по размерности отличается от вектора состояния $\bar{x}(t)$ тем, что учитывается $r \times n$ -матрицей $C(t)$.

Отличие размерностей получается ввиду причин, указанных в работе [5]:

- некоторые компоненты вектора $\bar{x}(t)$ не могут быть измерены;
- составляющие $\bar{x}(t)$ могут быть определены с учетом различных систем.

Например, параметры поступательного перемещения могут быть определены по сигналам РНС и СНС. Суммирование измерений имеет место в данном случае, что определено в работе [4].

Погрешности измерений определяются с использованием векторного белого шума $\bar{V}(t)$ с ковариационной матрицей:

$$M\{\bar{V}(t)\bar{V}^T(t-\tau)\} = R_2(t)'(t-\tau).$$

Исследования, проведенные в работах [4], [5], показали, что модель изменения состояния за счет динамических свойств судна, сигналов управления $\bar{U}(t)$ и внешних воздействий $\bar{f}(t)$ имеет вид

$$\frac{d\bar{x}}{dt} = A(t)\bar{x}(t) + B(t)\bar{U}(t) + \bar{f}(t), \quad (2)$$

где $M\{\bar{f}(t)\bar{f}^T(t-\tau)\} = Q_2(t)'(t-\tau)$;

$A(t)$ — $n \times m$ -матрица коэффициентов, которые определяются линеаризованными характеристиками ОУ в соответствующем управляющем режиме;

$B(t)$ — $n \times m$ -матрица линеаризованных коэффициентов для исполнительных органов судна.

Теорема разделения показывает, что при процессах по Гауссу наилучшая (минимум дисперсии ошибки) оценка $\hat{x}(t)$ состояния $\bar{x}(t)$ ОУ определяется следующими выражениями по Калману, представленными в работах [4], [11]:

$$\frac{d\hat{x}(t)}{dt} = A(t)\hat{x}(t) + B(t)\bar{U}(t) + K(t)(\bar{y}(t) - C(t)\hat{x}(t)), \quad (3)$$

где $\hat{x}(t_0) = \bar{x}(t_0)$, $\hat{x}(t_0)K(t) = P_2(t)C^T(t)R_2^{-1}(t)$;

$\dot{P}_2(t) = A(t)P_2(t)A^T(t) - P_2(t)C^T(t)R_2^{-1}(t)C(t)P_2(t) + Q_2(t)$ с начальным условием $P_2(t_0) = P_{20}$.

Ковариационная матрица вектора ошибок оценки $P_2(t)$ независима от наблюдений $\bar{y}(t)$ и закона управления $\bar{U}(t)$, который принят, и записана в память компьютера до начала работы СУДС для каждого из возможных балансировочных режимов.

Оптимально допустимое управление формируется как показано в работах [7], [8]:

$$\bar{U}(t) = K_1(t) \hat{x}(t);$$

$$K_1(t) = -R_1^{-1} B^T(t) P_1(t); \quad (4)$$

$$P_1(t) = -P_1(t) A(t) - A^T(t) P_1(t) + P_1(t) B(t) R_1^{-1}(t) P_1(t) - Q(t),$$

где $P_1(t_f) = S$.

На рис. 2 приведена схема вычислений для реализации оптимального управления. Такое решение содержит матрицы $A(t)$ и $B(t)$, в большой степени зависящие от кинематических параметров движения. В зависимости от параметров поступательного движения судна возникает необходимость корректировать элементы этих матриц. Меняющийся уровень внешних воздействий и погрешностей оценивания состояния также требует корректировки соответствующих матриц $Q_2(t)$ и $R_2(t)$.

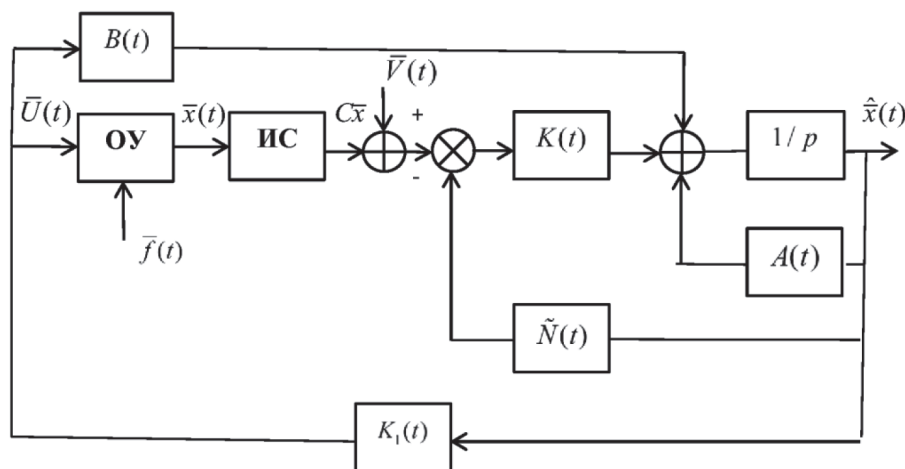


Рис. 2. Оптимальная СУДС

Исследования, проведенные в работах [7], [8], показали, что условие выполняется с использованием дополнительных блоков адаптации параметров СУДС. В этих задачах могут эффективно применяться безыдентификационные псевдоградиентные процедуры параметрической адаптации, носящие рекуррентный характер и требующие минимальных вычислительных затрат, что определено в работах [9], [10].

Пространственное движение судна в общем случае описывается системой, состоящей из двенадцати обыкновенных дифференциальных уравнений для производных линейных координат центра масс судна x_g, y_g, z_g в полусвязанной системе, углов Эйлера θ, φ, ψ и составляющих линейной V_x, V_y, V_z и угловой $\omega_x, \omega_y, \omega_z$ скорости [10]. Вектор $\underline{f}$ в модели определяется проекциями сил и моментов течения, ветра и волнения моря.

Нелинейные тригонометрические функции от углов Эйлера, а также произведения переменных состояния и нелинейных функциональных зависимостей гидродинамических сил и моментов при переменных параметрах движения определили нелинейность характера дифференциальных уравнений динамики движения, что показано в работах [11], [12]. Тем не менее при малых отклонениях кинематических параметров можно применять линеаризованные математические модели. Это является недостатком в исследованиях [1].

Разлагая в ряд Тейлора относительное состояние ОУ в режиме баланса, получим линейную модель движения судна в приращениях

$$d\bar{x} / dt = A_1 \cdot \bar{x}(t) + B_1 \cdot \bar{\delta}(t) + C_1 \cdot \bar{f}(t),$$

где матрицы A_1, B_1, C_1 получаются путем дифференцирования соответствующих нелинейных функций в стационарной точке.

Наиболее важной является модель рыскания судна, у которой вектор его состояния включает три переменных параметра [1], [12]:

- угол рыскания $\varphi(t)$,
- угловую скорость рыскания $\omega_y(t)$,
- угол дрейфа $\beta(t)$ — рис. 3.

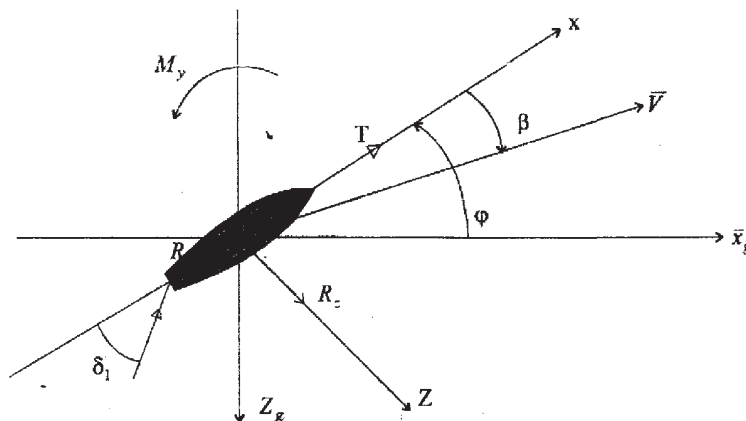


Рис. 3. Силы и моменты при рыскании судна

Линеаризация этой модели выглядит следующим образом. В общем случае угловая скорость рыскания $\omega_y = \dot{\varphi} \cdot \cos \varphi \cdot \cos \theta + \dot{\varphi} \cdot \sin \varphi$, где φ — угол дифферента; θ — угол крена. При малых θ и φ можно приближенно полагать $\omega_y(t) \cong \dot{\varphi}(t)$.

Проекции скорости $\bar{V}$ на соответствующие связанные координаты отражают поступательное движение:

$$V_x = V \cdot \cos \beta \cdot \cos \alpha, V_z = V \cdot \sin \beta,$$

но при малых углах атаки и дрейфа $V_x = V$; $V_z = V \cdot \beta$.

Если судно имеет постоянную скорость движения, то вместо скорости бокового сноса V_z в качестве переменной состояния берем угол дрейфа $\beta \cong \frac{V_z}{V}$.

В системе координат $\bar{V}_g = (V_{xg} V_{yg} V_{zg})^T$ скорость движения центра масс судна связана с проекциями на связанные оси соотношением

$$\bar{V}_g = B_V^{-1} \bar{V},$$

где B_V — кинематическая матрица.

При малых углах θ , ψ , φ получим уравнения связи:

$$V_{xg} = V(1 + \beta \cdot \varphi); V_{zg} = V(\beta - \varphi).$$

С учетом этих приближений находим уравнения для движения центра масс в системе координат:

$$dx_g / dt = V; dy_g / dt = V(\varphi - \alpha); dz / dt = -V(\varphi - \beta),$$

где α — угол атаки; $\sigma = \varphi - \beta$ — приращение путевого угла.

Теоремы, указывающие на изменение количества движения $\bar{K}$ и момента количества движения $\bar{L}$, отражают изменения мгновенных значений скоростей движения твердого тела:

$$d\bar{K} / dt + \bar{\Omega} \times \bar{K} = \bar{R};$$

$$d\bar{L} / dt = \bar{\Omega} \times \bar{L} + \bar{V} \times \bar{K} = \bar{M},$$

где $\bar{\Omega} = (\omega_x, \omega_y, \omega_z)$;

$\bar{R}(t)$, $\bar{M}(t)$ — соответственно главные вектор и момент внешних сил относительно начала координат.

Суммарная кинетическая энергия движения МПО

$$T = 0,5(V^T \Omega^T)(D + \Lambda)(\bar{V}^T \Omega^T)^T,$$

где D — инерционная матрица;

Λ — матрица, включающая присоединенные массы и моменты инерции.

При учете $K_{x,y,z} = \partial T / \partial V_{x,y,z}$; $L_{x,y,z} = \partial T / \partial \omega_{x,y,z}$ между кинетической энергией T и проекциями скоростей и векторов $\bar{K}$, $\bar{M}$ после преобразований получим общую форму уравнений динамики судна [1], [13]:

$$(\bar{m} + \mu_{11})\dot{V}_x = mV_y \omega_y + X_K + X_A + C_x U_x + f_x; \quad (5)$$

$$(\bar{m} + \mu_{22})\dot{V}_z = -mV_x \omega_y + Z_K + Z_A + C_z U_z + f_z;$$

$$(\bar{J}_y + \mu_{66})\dot{\omega}_y = M_K + M_A + M_R U_R + f_M; \omega_y = d\varphi / dt;$$

$$dx_g / dt = V_x \cos \varphi - V_z \sin \varphi; \quad dy_g / dt = V_z \cos \varphi - V_x \sin \varphi,$$

где $\bar{m}$ — масса судна;

$\bar{J}_y$ — момент инерции относительно вертикальной оси;

μ_{11} , μ_{22} — присоединенные массы;

μ_{66} — присоединенный момент инерции;

X_K , Z_K , M_K — гидродинамические силы и момент на подводной части корпуса судна;

X_A , Z_A , M_A — аэродинамические характеристики надводной части;

C_x , U_x , C_z , U_z , M_R , U_R — гидродинамические характеристики;

f_x , f_z , f_M — составляющие сил и момента, обусловленные течением, волнением и ветром соответственно.

Соотношения (5) можно представить в стандартной векторной форме (2), включая в вектор состояния $\bar{x}$ различные компоненты в зависимости от выбранного режима работы СУДС. В любом режиме работы при построении СУДС вырабатывается оценка $\hat{\bar{x}}(t)$ вектора $\bar{x}(t)$ состояния судна и формируется сигнал управления $\bar{U}(t)$, пропорциональный рассогласованию между заданным состоянием $\bar{x}_0(t)$ и оценкой вектора состояния (4). Для решения частных задач управления движением в вектор состояния $\bar{x}(t)$ целесообразно включить различные компоненты, а также применять различные информационные системы для построения оценок, например, как это сделано в работе [14].

Рассмотрим два основных режима работы СУДС: движение по заданному курсу и автоматическое удержание судна в заданной точке. Система управления курсом судна автоматически ориентирует его продольную ось в заданном направлении движения. Если заданный курс судна проходит по галсу K_0 , а его настоящий курс $K(t)$, то разность между ними образует угол рыскания $\varphi(t) = K_0 - K(t)$. В задачу СУДС входит минимизация $\varphi(t)$. Реализация такой функции управления осуществляется с помощью авторулевых различных типов [1]. В этом случае формируется вектор состояния $\bar{x}(t) = (\varphi(t)\omega_y(t)\beta(t))^T$, описываемый уравнениями динамики движения (2), (5).

Поставленную цель следует достигнуть путем формирования сигнала управления

$$U(t) = g_1 \varphi(t) + g_2 \omega_y(t) + g_3 \delta(t) + g_4 \int_0^t \varphi(t) dt$$

и организации соответствующих обратных связей (ПИД-регулятор, исследуемый в работе [4]).

Угол рыскания и угловую скорость рыскания, как правило, определяют с помощью гирокомпаса. Для реализации системы стабилизации путевого угла необходимо сформировать оценку угла дрейфа β и осуществить его компенсацию, например, с помощью поворота судна на угол рыскания $\varphi \approx \beta$. В настоящее время это выполняют с помощью спутниковых навигационных систем. Например, в дискретные моменты времени t_i ($i = 1, 2, \dots$) осуществляется измерение двух абсолютных координат судна: x_{0_i} и z_{0_i} :

$$y_{1i} = x_{0i} + \varepsilon_{1i}; y_{2i} = z_{0i} + \varepsilon_{2i}, i = 1, 2, \dots,$$

где $\varepsilon_{1i}, \varepsilon_{2i}$ — случайные независимые погрешности таких измерений с дисперсиями σ_{ε}^2 , которые для ПМИ первого класса составляют $\sigma_{\varepsilon} \sim 10$ м.

На участке с постоянной путевой скоростью $\bar{V}_0 = (V_{x_0} V_{z_0})^T$ уравнения, описывающие динамику изменения вектора состояния $\bar{x}_i = (x_{0i} z_{0i} V_{x_{0i}} V_{z_{0i}})^T$, запишутся в следующем виде:

$$\bar{x}_{0i} = x_{0(i-1)} V_{x_{0(i-1)}}; z_{0i} = z_{0(i-1)} + V_{z_{0(i-1)}}; V_{x_{0i}} = V_{x_{0(i-1)}}; V_{z_{0i}} = V_{z_{0(i-1)}}$$

или в векторной форме $\bar{x}_i = P\bar{x}_{i-1} + \bar{W}_i$, соответствующей уравнению (2).

Уравнения $\bar{y}_i = C\bar{x}_{i-1} + \bar{W}_i$ наблюдений запишутся в виде, аналогичном выражению (1):

$$C = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \end{pmatrix}; \bar{y}_i = \begin{pmatrix} y_{1i} \\ y_{2i} \end{pmatrix}; \bar{W}_i = \begin{pmatrix} w_{1i} \\ w_{2i} \end{pmatrix},$$

где C — матрица;

$\varepsilon_{1i}, \varepsilon_{2i}$ — случайные независимые погрешности измерений.

Для оптимальных оценок вектора состояния запишем уравнения Калмана по наблюдениям $\bar{y}_1, \bar{y}_2, \dots, \bar{y}_i$:

$$\hat{\bar{x}}_i(t) = \hat{\bar{x}}_{i-1} + P_i \cdot V_i^{-1} \cdot C^T (\bar{y}_i - C\hat{\bar{x}}_{i-1}).$$

Для автоматического удержания судна в заданной точке применяется система динамического позиционирования [1]. Движение судна при этом имеет малое значение линейной скорости. Силы на корпусе, вызванные собственным движением судна (гидроакустические), незначительны. Основными являются силы и моменты ветровых и волновых возмущений и средств управления.

Для информационного обеспечения системы, кроме гирокомпаса и СНС, обычно используются ГАС, определяющие пеленг $\Pi(t)$ и дальность $D(t)$ до «якорной точки» при постановке судна на носовом якоре.

Представим плоское движение центра масс в базовой неподвижной координатной системе, начало которой O_g совмещено с точкой позиционирования, а ось $O_g x_g$ направлена таким образом, чтобы силы ветра, течения и волнения, действующие на судно при угле рыскания $\varphi = 0$, были минимальными (рис. 4).

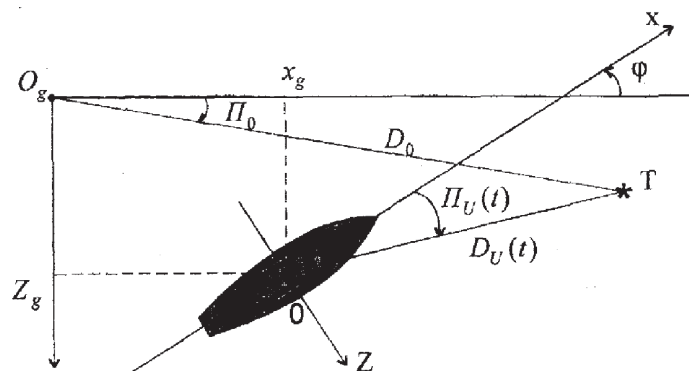


Рис. 4. Динамическое позиционирование

Для обеспечения автоматического управления судном в вектор состояния включено шесть переменных:

$$\bar{x} = (x_g z_g V_x V_z \varphi \omega_y)^T.$$

Спутниковая РНС позволяет получить информацию непосредственно о переменных состояния:

$$y_1(t) = x_g(t) + \varepsilon_1(t);$$

$$y_2(t) = z_g(t) + \varepsilon_2(t).$$

Информация от ГАС состоит в пеленге $y_{1r}(t) = \Pi_U(t) + \varepsilon_n(t)$ и дальности $y_{2r}(t) = D_U(t) + \varepsilon_D(t)$ до яркой точки T (рис. 4). Прямая запись наблюдений через переменные состояния оказывается в связи с этим нелинейной.

Результаты

Для построения СУДС в этом случае можно воспользоваться известными методами нелинейной теории управления [4]. Например, применить метод построения подсистемы автоматического слежения за яркой точкой, в которой формируются текущие оценки пеленга, дальности, их производных, а также проекции этих оценок на оси базовой и связанной систем координат. В этом случае на основе гидролокационных наблюдений получим следующие оценки:

$$y_7(t) = x_g(t) + \varepsilon_7(t); y_4(t) = z_g(t) + \varepsilon_4(t); y_5(t) = V_x(t) + \varepsilon_5(t); y_6(t) = V_z(t) + \varepsilon_6(t).$$

Информация от гирокомпаса:

$$y_7(T) = \varphi(t) + \varepsilon_7(t); y_8(T) = \omega_y(t) + \varepsilon_8(t).$$

Стандартная форма наблюдений, согласно уравнению (1),

$$\bar{y} = C\bar{x} + \varepsilon.$$

Для описания динамики изменения состояния используем уравнения (5) в форме уравнения (2), принимая при этом, что гидродинамические силы вязкостной природы $X_k(t)$ и $Z_k(t)$ можно считать малыми.

Оценка состояния и выработка сигналов управления осуществляются в соответствии с уравнениями (3), (4). При этом получается структура СУДС, в которую включены комплексированные методы измерения состояния $\bar{x}(t)$ на основе СНС и ГАС, имеющих собственную систему автоматического слежения за яркой точкой и формирование оценок проекций координат отклонения судна от заданной точки 0_g . На основе вектора отклонений координат от 0_g и вектора скоростей по формуле (4) рассчитываются необходимые сигналы управления.

Поскольку в режиме динамического позиционирования действие ветровых и волновых возмущений $\bar{f}(t)$ играет основную роль, для задания $\bar{f}(t)$ нельзя воспользоваться моделью белого шума (2). Учитывая, что адекватное описание $\bar{f}(t)$ представляет случайный процесс с дробно-рациональным спектром, можно записать $\bar{f}(t)$ как решение стохастического дифференциального уравнения второго или более высокого порядка [4]. При этом для идентификации коэффициентов модели целесообразно воспользоваться известными методами адаптации стохастических систем управления [2]. Общая запись алгоритмов оценивания при этом будет включать расширенный вектор состояния в соответствии с общими правилами оценивания по Калману при небелых шумах формирующего фильтра [4].

Выводы

1. В результате выполненных действий можно найти общее решение связанных между собой задач комплексирования различных измерительных систем и выработки необходимых сигналов управления судном в условиях ветровых и волновых возмущений.

2. Появление каких-либо дополнительных источников информации о положении судна, а также использование разнообразных подруливающих устройств не приводит к изменению основных математических соотношений.

3. Основные формулы могут быть записаны для решения задачи оптимального управления в дискретном времени, соответствующей современным способам сбора и переработки информации с помощью бортового вычислителя.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Соляков О. В. Использование современных глобальных навигационных спутниковых систем и их функциональных дополнений на внутренних водных путях: монография / О. В. Соляков. — М.: ФГБОУ ВО «МГАВТ», 2016. — 176 с.

2. Румянцев А. Ю. Оптимальное управление в системах электродвижения судов по критерию минимума потерь / А. Ю. Румянцев, В. Ф. Самосейко, Н. В. Белоусова // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2016. — № 6 (40). — С. 206–213. DOI: 10.21821/2309-5180-2016-8-6-206-213.
3. Сахаров В. В. Алгоритм энергоэффективного управления курсом судна / В. В. Сахаров, А. Г. Таранин, А. А. Чертков // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2013. — № 3 (22). — С. 38–46.
4. Korn A. G. Mathematical handbook for scientists and engineers: definitions, theorems, and formulas for reference and review / A. G. Korn, T. M. Korn. — N.-Y.: Dover Publications, Inc., 2000. — 1130 p.
5. Gao S. Real-time traveler information for optimal adaptive routing in stochastic time-dependent networks / S. Gao, H. Huang // Transportation Research Part C: Emerging Technologies. — 2012. — Vol. 21. — Is. 1. — Pp. 196–213. DOI: 10.1016/j.trc.2011.09.007.
6. Лебедева М. П. Методика оценки безопасного движения судов в стесненной акватории / М. П. Лебедева, С. Д. Айзинов, А. О. Лебедев // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2017. — Т. 9. — № 1. — С. 111–120. DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-1-111-120.
7. Студеникин Д. Е. Применение систем принятия решений для выбора параметров маневра судна / Д. Е. Студеникин, А. А. Григорян, Н. А. Маковецкая // Эксплуатация морского транспорта. — 2015. — № 4. — С. 58–62.
8. Мироненко А. А. Модель программного движения судна в стесненных водах / А. А. Мироненко // Мехатроника, автоматизация, управление. — 2013. — № 2. — С. 65–70.
9. Weng J. Ship collision frequency estimation in port fairways: a case study / J. Weng, S. Xue // The Journal of Navigation. — 2015. — Vol. 68. — Is. 3. — Pp. 602–618. DOI: 10.1017/S0373463314000885.
10. Гриняк В. М. Оценка и представление параметров безопасного движения судна / В. М. Гриняк, М. В. Трофимов, В. И. Люлько // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2016. — № 4 (38). — С. 51–61. DOI: 10.21821/2309-5180-2016-8-4-51-61.
11. Burmeister H. C. Interaction of Harsh Weather Operation and Collision Avoidance in Autonomous Navigation / H. C. Burmeister, W. C. Bruhn, L. Walthe // TransNav: International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation. — 2015. — Vol. 9. — Nr. 1. — Pp. 31–40. DOI: 10.12716/1001.09.01.04.
12. Benedict K. Simulation Augmented Manoeuvring Design and Monitoring – a New Method for Advanced Ship Handling / K. Benedict, M. Kirchhoff, M. Gluch, S. Fischer, M. Schaub // TransNav: International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation. — 2014. — Vol. 8. — Nr 1. — Pp. 131–141. DOI: 10.12716/1001.08.01.15.
13. Baldauf M. Energy-efficient Ship Operation – Training Requirements and Challenges / M. Baldauf, R. Baumler, A. Olcer, T. Nakazawa, K. Benedict, S. Fischer, M. Schaub // TransNav: International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation. — 2013. — Vol. 7. — Nr 2. — Pp. 283–290. DOI: 10.12716/1001.07.02.16.
14. Masjed-Jamei M. Unified error bounds for all Newton–Cotes quadrature rules / M. Masjed-Jamei // Journal of Numerical Mathematics. — 2015. — Vol. 23. — Is. 1. — Pp. 67–80. DOI: 10.1515/jnma-2015-0006.

REFERENCES

1. Solyakov, O.V. *Ispol'zovanie sovremennykh global'nykh navigatsionnykh sputnikovykh sistem i ikh funktsional'nykh dopolnenii na vnutrennikh vodnykh putyakh: monografiya*. M.: FGBOU VO «MGAVT», 2016.
2. Rumyantsev, Alexey Yurevich, Veniamin Frantsevich Samoseiko, and Nadezhda Vladislavovna Belousova. “Optimal control of the electric propulsion systems of vessels on the criterion of minimum losses.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova* 6(40) (2016): 206–213. DOI: 10.21821/2309-5180-2016-8-6-206-213.
3. Sakharov, V.V., A.G. Taranin, and A.A. Chertkov. “Energoefficient ship steering control algorithm.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova* 3(22) (2013): 38–46.
4. Korn, A.G., and T.M. Korn. *Mathematical handbook for scientists and engineers: definitions, theorems, and formulas for reference and review*. N.Y.: Dover Publications, Inc., 2000.
5. Gao, Song, and He Huang. “Real-time traveler information for optimal adaptive routing in stochastic time-dependent networks.” *Transportation Research Part C: Emerging Technologies* 21.1 (2012): 196–213. DOI: 10.1016/j.trc.2011.09.007.

6. Lebedeva, Marina P., Sergei D. Aizinov, and Aleksei O. Lebedev. "Technique of assessment of the safe navigation in the «constrained» water area." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova* 9.1 (2017): 111–120. DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-1-111-120.
7. Studenikin, D., A. Grigoryan, and N. Makovetskaya. "The use of decision support systems for choosing parameters of vessel's maneuvering." *Ekspluatatsiya morskogo transporta* 4 (2015): 58–62.
8. Mironenko, A.A. "Vessel's program motion model in restricted waters." *Mekhatronika, avtomatizatsiya, upravlenie* 2 (2013): 65–70.
9. Weng, Jinxian, and Shan Xue. "Ship collision frequency estimation in port fairways: A case study." *The Journal of Navigation* 68.3 (2015): 602–618. DOI: 10.1017/S0373463314000885.
10. Grinyak, Victor Mihajlovich, Maxim Valerevich Trofimov, and Victor Ivanovich Lulko. "Data visualization of ship collision avoidance system." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova* 4(38) (2016): 51–61. DOI: 10.21821/2309-5180-2016-8-4-51-61.
11. Burmeister, H-C., W. C. Bruhn, and Laura Walther. "Interaction of harsh weather operation and collision avoidance in autonomous navigation." *TransNav: International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation* 9.1 (2015): 31–40. DOI: 10.12716/1001.09.01.04.
12. Benedict, Knud, M. Kirchhoff, M. Gluch, S. Fischer, and M. Schaub. "Simulation Augmented Manoeuvring Design and Monitoring—a New Method for Advanced Ship Handling." *TransNav: International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation* 8.1 (2014): 131–141. DOI: 10.12716/1001.08.01.15.
13. Baldauf, Michael, R. Baumler, A. Olcer, T. Nakazawa, K. Benedict, S. Fischer, and M. Schaub. "Energy-efficient Ship Operation—Training Requirements and Challenges." *TransNav: International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation* 7.2 (2013): 283–290. DOI: 10.12716/1001.07.02.16.
14. Masjed-Jamei, Mohammad. "Unified error bounds for all Newton–Cotes quadrature rules." *Journal of Numerical Mathematics* 23.1 (2015): 67–80. DOI: 10.1515/jnma-2015-0006.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Соляков Олег Владимирович —
кандидат технических наук, доцент,
ФГБОУ ВО «Российский университет транспорта
(МИИТ)»

127994, Российская Федерация, г. Москва,
ул. Образцова 9, стр. 9

e-mail: solyakovl@yandex.ru

Потемкин Андрей Александрович — аспирант
Научный руководитель:

Соляков Олег Владимирович
ФГБОУ ВО «Российский университет транспорта
(МИИТ)»

127994, Российская Федерация, г. Москва,
ул. Образцова 9, стр. 9

e-mail: andrey.potemkin@inbox.ru

Першин Никита Вячеславович — инспектор
Публичное акционерное общество «Газпром»
196105, Российская Федерация, г. Санкт-Петербург,
Московский пр., д. 156, лит. А
e-mail: nikita.pershin@mail.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Soliakov, Oleg V. —
PhD, associate professor, assistant to the rector
Russian University of Transport (MIIT)
9b9 Obrazcova Str.,
Moscow, 127994,
Russian Federation
e-mail: solyakovl@yandex.ru

Potemkin, Andrey A. — Postgraduate
Supervisor:

Soliakov, Oleg V. —
Russian University of Transport (MIIT)
9b9 Obrazcova Str.,
Moscow, 127994,
Russian Federation

e-mail: andrey.potemkin@inbox.ru

Pershin, Nikita V. — Inspector
Public Joint Stock Company Gazprom
156/lit.A Moskovskii Av., St. Petersburg, 196105,
Russian Federation
e-mail: nikita.pershin@mail.ru

Статья поступила в редакцию 15 октября 2017 г.

Received: October 15, 2017.

DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-6-1197-1208

STABILITY ANALYSIS OF TWO-CHAIN SUSPENSION ARRANGEMENT WITH ELASTIC SLINGS FOR LARGE-SCALE AND HEAVY LIFT CARGO OPERATIONS

Y. V. Nikitin

The Black Sea Naval College named after P. S. Nakhimov,
Sevastopol, Russian Federation

The stability analysis of two-chain suspension arrangements for large-scale and heavy-lift cargo operations has been conducted. Today, such suspension systems are broadly used on board ships. The stability analysis carried out on the assumption that such suspension systems can be considered as a mechanical system with ideal holonomic linkages having two degrees of freedom. In addition, the secondary slings of the suspension system are initially parallel to each other, and all slings of the system are elastic ones, that is lengthened under load. It has been shown that such a suspension system is in the stable equilibrium position (despite the possible deflection from the origins and shape change) if the center of gravity of a load suspended is inside or on the borders of a certain area – an isosceles triangle (called as a “safety triangle”). The base of this triangle is the cargo platform (or the segment between two fixing points of the secondary slings), and the height of the “safety triangle” depends on the relationship between masses of the spreader and the load and elongations of the elastic slings as well. If a suspension system is in the critical position of stable equilibrium (that takes place when the center of gravity of the load is located on one of the sides of the “safety triangle”), then the analytical expressions for estimation of the deflection (tilting angle) of the spreader relative to the original (horizontal) position have been developed. For such critical position, the equations allowing to calculate the elongations of all elastic slings, as well as the dimensions (height and length of the base) of the “safety triangle” have been also developed. All equations and formulas developed have been appropriately demonstrated by the numerical example. A comparative stability analysis of two-chain suspension arrangements with elastic and non-elastic slings has been also performed. As a result, it has been shown that, all other things being equal, a suspension arrangement with non-elastic slings is more stable (the height of its “safety triangle” is greater) than a system with elastic slings.

Keywords: two-chain suspension arrangement, stability, critical position of equilibrium, “safety triangle”, elastic and non-elastic slings.

For citation:

Nikitin, Yevgeny V. “Stability analysis of two-chain suspension arrangement with elastic slings for large-scale and heavy lift cargo operations.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admiral S.O. Makarova* 9.6 (2017): 1197–1208. DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-6-1197-1208.

УДК 629.123; 629.5.065.2

АНАЛИЗ УСТОЙЧИВОСТИ ДВУХЗВЕННЫХ СИСТЕМ ПОДВЕШИВАНИЯ С ЭЛАСТИЧНЫМИ СТРОПАМИ ПРИ ПОГРУЗКЕ / ВЫГРУЗКЕ КРУПНОГАБАРИТНЫХ И ТЯЖЕЛОВЕСНЫХ ГРУЗОВ

Е. В. Никитин

Черноморское высшее военно-морское училище имени П. С. Нахимова,
Севастополь, Российская Федерация

Проведен анализ статической устойчивости двухзвенных систем подвешивания крупногабаритных и тяжеловесных грузов (КТГ), которые достаточно широко применяются сегодня на морском транспорте. Анализ устойчивости проведен исходя из предположения о том, что такие системы подвешивания (СП) могут быть рассмотрены как механические системы с идеальными голономными связями, имеющие две степени свободы. При этом вторичные стропы СП первоначально параллельны друг другу, а все стропы системы являются эластичными, т. е. удлиняются под действием нагрузки. Показано, что такая система находится в положении устойчивого равновесия (несмотря на ее возможное отклонение от исходного

положения и изменение формы), если ЦТ груза расположен внутри или на границах некоторой области — равнобедренного треугольника, названного условно «треугольником безопасности» (ТБ). Показано, что основание ТБ — это платформа вторичного подвеса (отрезок между точками крепления вторичных строп), а высота ТБ зависит от отношения массы траверсы и груза, а также величины удлинения эластичных строп. Для случая предельного положения устойчивого равновесия СП (когда ЦТ груза размещен на одной из боковых сторон «треугольника безопасности») получено аналитическое выражение для оценки угла отклонения траверсы относительно исходного (горизонтального) положения. Для такого предельного случая получены также уравнения, позволяющие рассчитать удлинения всех эластичных строп, а также вычислить размеры (высоту и длину основания) ТБ, т. е. области, внутри которой должен находиться ЦТ груза, чтобы двухзвенная система подвешивания оставалась в положении устойчивого равновесия. Возможности разработанных методов и аналитических выражений демонстрируются с помощью конкретного числового примера. Выполнен также сравнительный анализ устойчивости двухзвенных систем подвешивания с эластичными и неэластичными стропами. Показано, что при прочих равных условиях высота и площадь «треугольника безопасности», а значит, и устойчивость СП выше в случае применения неэластичных строп.

Ключевые слова: двухзвенная система подвешивания, устойчивость, предельное положение равновесия, «треугольник безопасности», эластичные стропа.

Для цитирования:

Никитин Е. В. Анализ устойчивости двухзвенных систем подвешивания с эластичными стропами при погрузке / выгрузке крупногабаритных и тяжеловесных грузов / Е. В. Никитин // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2017. — Т. 9. — № 6. — С. 1197–1208. DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-6-1197-1208.

Введение (Introduction)

Для погрузки / выгрузки на судах крупногабаритных и тяжеловесных грузов (КТГ) довольно часто применяют комплексные (двухзвенные) системы их подвешивания к подъемному устройству. Пример такой системы подвешивания (СП) приведен на рис. 1. Данные системы при определенных условиях могут быть неустойчивыми и способны опрокинуться после их подвешивания подъемным краном со всеми вытекающими негативными последствиями как для судна, так и для груза.

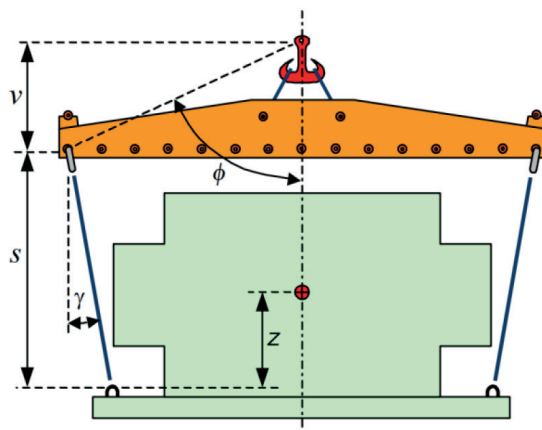


Рис. 1. Пример двухзвенной системы подвешивания крупногабаритного груза

Одна из первых попыток оценить каким-то образом устойчивость двухзвенных систем подвешивания груза была предпринята в работах [1] – [3]. На основе аналогии с начальной устойчивостью судна проф. Г. Капс [1] – [3] предложил методику и расчетные формулы для оценки предельной высоты положения центра тяжести (ЦТ) груза относительно СП (погрузочной платформы CD — рис. 2). Однако эта методика не соответствует классической концепции устойчивости механических систем, поэтому в ряде случаев может давать значительные ошибки, что было продемонстрировано в [4] – [6]. Кроме того, она не позволяет определить всю область допустимых положений ЦТ груза относительно СП так, чтобы последняя сохраняла устойчивое положение

равновесия. Поэтому в работах [6], [7] на основе представления СП с КТГ как механической системы тел с идеальными связями и двумя степенями свободы относительно точки подвеса S , был выполнен анализ условий для ее устойчивого равновесия. При этом получены аналитические выражения, позволяющие, с одной стороны, рассчитать предельный угол отклонения траверсы AB от исходного (горизонтального положения), а также определить некую область, размещение ЦТ груза внутри которой позволяет СП оставаться в устойчивом положении равновесия. Эта область, имеющая форму равнобедренного треугольника, была названа «треугольником безопасности» (ТБ). Основание ТБ совпадает с расстоянием между точками крепления вторичных строп к КТГ (точками C и D), а высота зависит от высоты первичного подвеса SE (см. рис. 2) и отношения масс траверсы AB (p) и поднимаемого (подвешиваемого) груза (P_c).

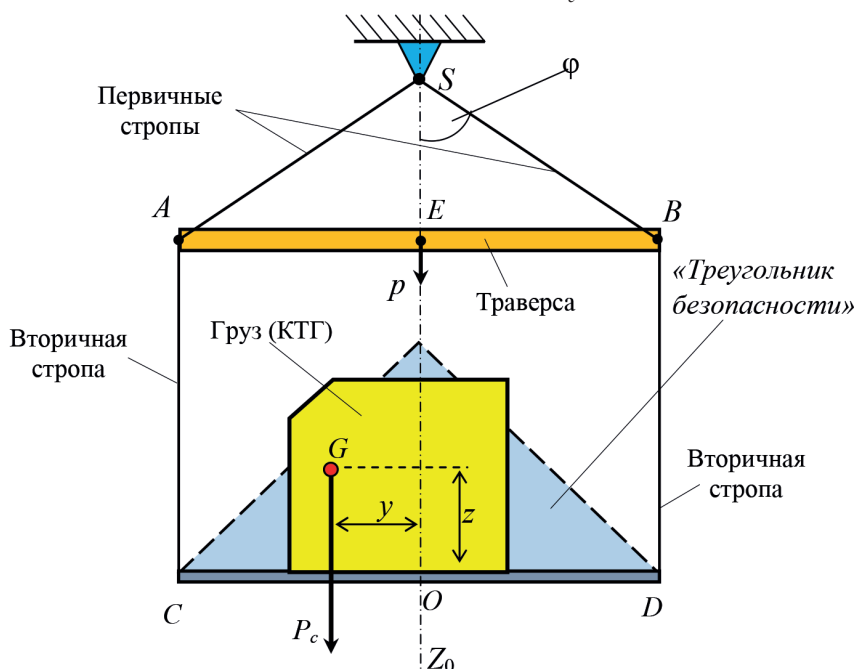


Рис. 2. Система подвешивания КТГ с параллельными вторичными стропами в первоначальном положении (до момента ее подвеса в точке S)

Известно, что в практике перегрузок КТГ, при составлении планов или временных технологических инструкций перегрузки, поперечное смещение ЦТ груза относительно точки подвеса S (см. рис. 2) не допускается [8], [9]. Тем не менее, по мнению автора статьи, возможность определения всей допустимой области (ТБ) положения ЦТ груза относительно СП дает ряд преимуществ как составителю плана перегрузки КТГ, так и его исполнителям. Например, это позволяет сравнивать системы подвешивания различной конфигурации по уровню устойчивости, выбирая при этом наилучшую. Кроме того, знание размеров ТБ может позволить разместить ЦТ груза как можно дальше от его границ, особенно по высоте, так как в источниках [4] – [6] показано, что нахождение ЦТ в непосредственной близости от вершины ТБ и даже внутри него является нежелательным, так как сама вершина ТБ является точкой неустойчивости. Наконец, знание размеров ТБ и размещение ЦТ груза как можно дальше от его границ поможет повысить устойчивость СП в целом и, как следствие, позволит избежать негативного воздействия разного рода случайностей (неожиданного порыва ветра, качки судна, раскачивания СП со значительной амплитудой, смещения груза в процессе перегрузки и т. д.).

В работах [10] и [11], на основе данных источников [6] и [7], проанализирована устойчивость СП с параллельными и эластичными стропами вторичного подвеса. Однако случай эластичности (растяжимости) всех строп, включая растяжимость строп SA , SB первичного подвеса не рассматривался.

Исходя из ранее изложенного, целью данной статьи является анализ устойчивости двухзвенных систем подвешивания КТГ со всеми эластичными стропами при условии, что в первоначальном положении вторичные стропа СП параллельны друг другу.

Методы и материалы (Methods and Materials)

Пусть задана двухзвенная СП, у которой стропа вторичного подвеса AC , BD первоначально (до подвешивания) равны и параллельны друг другу (см. рис. 2). При этом все стропа системы — и первичные, и вторичные — являются растяжимыми (эластичными). В предельном положении равновесия СП, которое наступает при условии, что ЦТ груза находится на краю погрузочной платформы — в точке C [6], [7], [10], [11], первичный подвес принимает вид неправильного ко-соугольного треугольника (стропа SA_e становится длиннее SB_e). При этом траверса AC , из-за неодинакового удлинения строп, займет положение A_eC_e , отклонившись относительно начального положения (линии горизонта) на угол α_m (рис. 3).

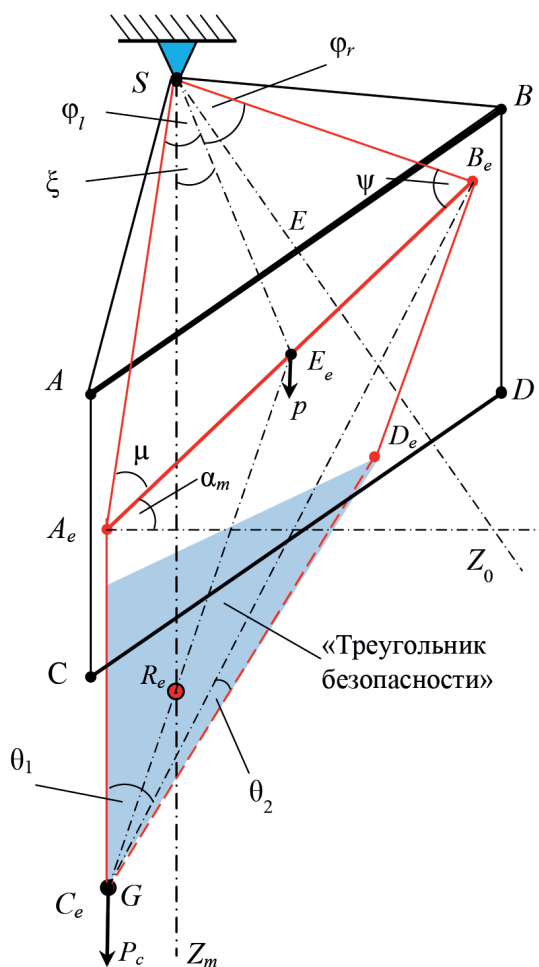


Рис. 3. Предельное положение равновесия СП при нерастяжимых (фигура $SABCD$) и растяжимых ($SA_eB_eC_eD_e$) стропах (ЦТ груза размещен в точке C_e)

Важно, что угол между вертикалью Z_{me} и отрезком SE_e не равен α_m (как это было в случае нерастяжимых первичных строп [6], [7]). Поэтому он обозначен буквой ξ (см. рис. 2). Углы между отрезком SE_e и стропами SA_e и SB_e также изменились. Они более не равны друг другу и поэтому обозначены ϕ_l и ϕ_r соответственно. Углы при основании треугольника первичного подвеса SA_eB_e также более не равны друг другу ($\mu \neq \psi$). Вторичная (левая) стропа A_eC_e удлинится за счет того, что сила тяжести груза P_c полностью приложена только к ней. В результате вторичный подвес становится неправильным четырехугольником (см. рис. 3).

При определенных условиях удлинение вторичной стропы $A_e C_e$ может привести к тому, что платформа CD и ненагруженная стропы BC окажутся на одной прямой, превращая, таким образом, вторичный подвес из четырехугольника в треугольник. При этом стропы $B_e C_e$ также начнет воспринимать часть нагрузки, а значит, и растягиваться. Этот случай равновесия системы в данной статье рассматриваться не будет.

Результаты (Results)

Для того чтобы определить удлинение нагруженных строп системы подвешивания, необходимо в первую очередь вычислить силы, действующие на них в предельном положении равновесия. Для их вычисления рассмотрим равновесие траверсы AB ($A_e B_e$) со всеми приложенными к ней силами (рис. 4). Из рисунка видно, что в положении равновесия на траверсу AB действуют четыре внешние силы: P_c — сила тяжести груза, расположенного в точке C ; p — сила тяжести самой траверсы; F_r и F_l — силы натяжения первичных строп, удерживающих траверсу AB . Для того чтобы траверса AB находилась в положении равновесия, необходимо и достаточно, чтобы сумма проекций всех сил на каждую из двух координатных осей и сумма их моментов относительно любого центра, лежащего в плоскости действия сил, были равны нулю [5].

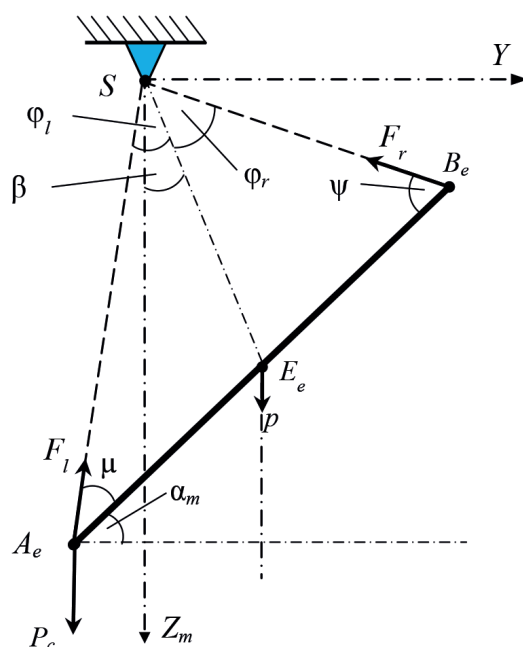


Рис. 4. Траверса AB в предельном положении равновесия со всеми приложенными внешними силами

Для математической записи этих условий равновесия выберем систему координат $Z_m SY$ (см. рис. 4). Тогда сумму проекций всех сил на вертикальную ось $Z_m S$ можно записать в виде

$$P_c + p - F_l \cos(\varphi_l - \xi) - F_r \cos(\varphi_r + \xi) = 0. \quad (1)$$

Сумма проекций этих же сил на горизонтальную ось SY равна

$$F_l \sin(\varphi_l - \beta) - F_r \sin(\varphi_r + \beta) = 0. \quad (2)$$

Вычислим также сумму моментов всех сил относительно центра — точки A_e , и приравняем ее нулю. Принимая, что $A_e B_e = 2b$, м, получим

$$2bF_r \sin \psi - pb \cos \alpha_m = 0. \quad (3)$$

Система уравнений (1) – (3) описывает необходимые и достаточные условия для равновесия траверсы AB в предельном положении равновесия системы подвешивания в целом.

Из уравнения (3) можно получить

$$F_l = F_r \frac{\sin(\varphi_r + \xi)}{\sin(\varphi_l - \xi)}. \quad (4)$$

Подставив выражение (4) в уравнение (1), получим

$$P_c + p - F_r \frac{\sin(\varphi_r + \xi)}{\sin(\varphi_l - \xi)} \cos(\varphi_l - \xi) - F_r \cos(\varphi_r + \xi) = 0,$$

откуда после преобразований получим

$$P_c + p - F_r \frac{\sin(\varphi_r + \varphi_l)}{\sin(\varphi_l - \xi)} = 0,$$

или

$$F_r = (P_c + p) \frac{\sin(\varphi_l - \xi)}{\sin(\varphi_r + \varphi_l)}. \quad (5)$$

Подставив уравнение (5) в выражение (4), получим

$$F_l = (P_c + p) \frac{\sin(\varphi_r + \xi)}{\sin(\varphi_r + \varphi_l)}. \quad (6)$$

Теперь подставим уравнение (6) в (3). В результате можно получить следующее выражение:

$$\cos \alpha_m = \frac{2}{p} (P_c + p) \frac{\sin(\varphi_l - \xi) \sin \psi}{\sin(\varphi_r + \varphi_l)}. \quad (7)$$

Учитывая, что

$$\varphi_l - \xi = \frac{\pi}{2} - \alpha_m - \mu; \quad \varphi_r + \xi = \frac{\pi}{2} + \alpha_m - \psi; \quad \varphi_l + \varphi_r = \pi - \mu - \psi,$$

можно записать:

$$\sin(\varphi_l - \xi) = \sin\left(\frac{\pi}{2} - \alpha_m - \mu\right) = \cos(\alpha_m + \mu); \quad (8)$$

$$\sin(\varphi_r + \varphi_l) = \sin(\pi - \mu - \psi) = \sin(\mu + \psi). \quad (9)$$

Подставив выражения (8) и (9) в уравнение (7), получим

$$\cos \alpha_m = \frac{2}{p} (P_c + p) \frac{\cos(\alpha_m + \mu) \sin \psi}{\sin(\mu + \psi)}. \quad (10)$$

Учитывая, что

$$\cos(\alpha_m + \mu) = \cos \alpha_m \cos \mu - \sin \alpha_m \sin \mu,$$

выражение (10) примет следующий вид:

$$\cos \alpha_m = \frac{2}{p} (P_c + p) \frac{(\cos \alpha_m \cos \mu - \sin \alpha_m \sin \mu) \sin \psi}{\sin(\mu + \psi)}.$$

Разделив обе части последнего уравнения на $\cos \alpha_m$, получим

$$1 = \frac{2}{p} (P_c + p) \frac{(\cos \mu - \operatorname{tg} \alpha_m \sin \mu) \sin \psi}{\sin(\mu + \psi)}. \quad (11)$$

Выполнив преобразования выражения (11) с учетом того, что

$$\sin(\mu + \psi) = \sin \mu \cos \psi + \cos \mu \sin \psi,$$

можно окончательно получить следующее выражение:

$$\operatorname{tg} \alpha_m = \operatorname{ctg} \mu - \frac{P}{2(P_c + p)} (\operatorname{ctg} \psi + \operatorname{ctg} \mu). \quad (12)$$

Уравнения (5), (6) и (12) образуют систему, полностью описывающую предельное положение равновесия траверсы AC при всех растяжимых стропях. С их помощью можно вычислить как силы, растягивающие первичные стропы, так и предельный угол α_m отклонения траверсы AC .

Обсуждение (Discussion)

Если первичные стропы нерастяжимы, то первичный подвес превращается в равнобедренный треугольник SAC , в котором:

$$\psi = \mu = \frac{\pi}{2} - \varphi; \quad (13)$$

$$\mu + \psi = \pi - 2\varphi; \quad (14)$$

$$\varphi_r + \varphi_l = 2\varphi; \quad (15)$$

$$\xi = \alpha_m. \quad (16)$$

С учетом выражений (13) – (16), а также уравнения (10) система уравнений (5), (6) и (12) примет вид:

$$F_r = (P_c + p) \frac{\sin(\varphi - \alpha_m)}{\sin 2\varphi}; \quad (17)$$

$$F_l = (P_c + p) \frac{\sin(\varphi + \alpha_m)}{\sin 2\varphi}; \quad (18)$$

$$\operatorname{tg} \alpha_m = \frac{\operatorname{tg} \varphi}{\left(1 + \frac{P}{P_c}\right)}. \quad (19)$$

Последнее уравнение (19) полностью идентично представленным ранее в работах [6] – [9], что вполне логично. Однако оно получено на основе иных соображений и совершенно другим способом.

Определив по уравнениям (17) – (19) силы F_r , F_l , растягивающие первичные стропы, необходимо вычислить их удлинение, для чего можно воспользоваться приемом, изложенным в работах [2], [3], в соответствии с которым удлинение строп можно рассчитать следующим образом:

$$dL = \frac{FL}{D_N}, \quad (20)$$

где dL — удлинение стропы, м;

F — сила, действующая на стропу, тс;

L — исходная длина стропы (без нагрузки), м;

D_N — константа упругости стропы (*Nominal Spring Constant*), тс.

Константа упругости D_N может быть определена следующим образом [2], [3]:

$$D_N = \frac{WLL}{\varepsilon}, \quad (21)$$

где WLL — допустимая рабочая нагрузка стропы (*Weight Load Limit*), тс (допустимая сила растяжения стропы, оцениваемая производителем строп);

$\varepsilon = \frac{dL}{L}$ — относительное удлинение стропы при приложении предельной рабочей нагрузки (WLL).

Так, например, для строп из полиэстера, которые сегодня широко применяются, $\epsilon = 0,023$ (при приложении к ним WLL). В этом случае, при условии, если первичные стропы нагружены до предельной рабочей нагрузки (WLL), константа упругости

$$D_N = \frac{(P_c + p)}{2\epsilon \cos \varphi} = \frac{(P_c + p)}{0,046 \cos \varphi}. \quad (22)$$

Для вторичных строп, на которые действует только сила P_c , константу упругости можно определить по аналогичной формуле, заменив угол φ на γ , т. е.

$$D_N = \frac{P_c}{2\epsilon \cos \gamma} = \frac{P_A}{0,046 \cos \gamma}. \quad (23)$$

В результате неодинакового удлинения первичных строп первичный подвес из равнобедренного превращается в косоугольный треугольник $SA_e B_e$ (см. рис. 2 и 3). Причем все стороны этого треугольника известны или могут быть вычислены. Поэтому, следуя данным работы [12], можно вычислить и углы μ , ψ этого косоугольного треугольника по следующим формулам:

$$\mu = 2 \arctg \left(\frac{m_\alpha}{F_\alpha - SB_e} \right); \quad (24)$$

$$\psi = 2 \arctg \left(\frac{m_\alpha}{F_\alpha - SA_e} \right), \quad (25)$$

где

$$F_\alpha = \frac{1}{2}(SA_e + SB_e + AB); \quad (26)$$

$$m_\alpha = \sqrt{\frac{(F_\alpha - SA_e)(F_\alpha - SB_e)(F_\alpha - AB)}{F_\alpha}}. \quad (27)$$

Вычислив по формулам (24) – (27) углы μ , ψ , по формуле (12) можно определить угол α_m отклонения траверсы AB в предельном положении равновесия СП. Так как в предельном положении равновесия вторичный подвес будет образовывать четырехугольник, далее из треугольника $A_e B_e E_e$, в котором угол при вершине B_e известен и равен $\alpha_m + \pi/2$ (см. рис. 2), по теореме косинусов вычислим значение стороны $B_e C_e$, а затем по теореме синусов — значение угла θ_1 [12]:

$$B_e C_e^2 = (2b)^2 + A_e C_e^2 - 2b \cdot A_e C_e \cos \left(\alpha_m + \frac{\pi}{2} \right)$$

или

$$B_e C_e = \sqrt{(2b)^2 + A_e C_e^2 + 2b \cdot A_e C_e \sin \alpha_m}; \quad (28)$$

$$\sin \theta_1 = \frac{2b}{B_e C_e} \sin \left(\alpha_m + \frac{\pi}{2} \right) = \frac{2b}{B_e C_e} \cos \alpha_m,$$

или

$$\theta_1 = \arcsin \left(\frac{2b}{B_e C_e} \cos \alpha_m \right). \quad (29)$$

Теперь из треугольника $C_e B_e D_e$, в котором известны все его стороны, можно вычислить угол θ_2 следующим образом [12]:

$$\theta_2 = 2 \arctg \left(\frac{m_\theta}{F_\theta - r} \right), \quad (30)$$

где

$$F_\theta = \frac{1}{2}(B_e C_e + r + CD); \quad (31)$$

$$m_{\theta} = \sqrt{\frac{(F_{\theta} - B_e C_e)(F_{\theta} - r)(F_{\theta} - CD)}{F_{\theta}}}. \quad (32)$$

С учетом ранее изложенного, угол θ в основании «треугольника безопасности» можно вычислить как сумму

$$\theta = \theta_1 + \theta_2. \quad (33)$$

Пример. Двухзвенная система подвешивания с грузом весом $P_c = 160$ тс и параллельными стропами вторичного подвеса (см. рис. 3), перед ее подвешиванием судовым краном, имеет следующие характеристики: $\varphi = 42^\circ$; $AB = 2b = 8$ м; $a = b \operatorname{ctg} \varphi = 4,44$ м; $AC = BD = r = 7$ м; масса траверсы AB $p = 30$ тс. Необходимо вычислить предельный угол отклонения первичного подвеса α_m , а также размеры «треугольника безопасности» при условии, что все стропы, изготовленные из полиэстера, растяжимы ($\varepsilon = 0,023$). Предполагается также, что стропы подобраны таким образом, чтобы можно было работать при предельной рабочей нагрузке (WLL).

Решение

1. По формулам (17), (18) вычислим силы, растягивающие первичные стропы:

$$\operatorname{tg} \alpha_m = \frac{\operatorname{tg} \varphi}{\left(1 + \frac{p}{P_c}\right)} = \frac{\operatorname{tg} 42^\circ}{\left(1 + \frac{30}{160}\right)} = \frac{0,9004}{1,1875} = 0,7582;$$

$$\alpha_m = 37,2^\circ;$$

$$F_r = (P_c + p) \frac{\sin(\varphi - \alpha_m)}{\sin 2\varphi} = 190 \cdot \frac{\sin 4,8^\circ}{\sin 84^\circ} = 190 \cdot \frac{0,08368}{0,9945} = 15,99 \text{ тс};$$

$$F_l = (P_c + p) \frac{\sin(\varphi + \alpha_m)}{\sin 2\varphi} = 190 \cdot \frac{\sin 79,2^\circ}{\sin 84^\circ} = 190 \cdot \frac{0,9823}{0,9945} = 187,67 \text{ тс}.$$

2. По формуле (22) определим константу растяжения первичных строп:

$$D_N = \frac{(P_c + p)}{0,046 \cos \varphi} = \frac{(160 + 30)}{0,046 \cdot 0,7432} = 5557,6 \text{ тс}.$$

3. По исходным данным вычислим исходную длину первичных строп:

$$SA = SB = \frac{v}{\cos \varphi} = \frac{4,44}{0,7432} = 5,974 \text{ м}.$$

4. По формуле (20) вычислим удлинение левой (dL_l) и правой (dL_r) первичных строп:

$$dL_l = \frac{F_l \cdot SA}{D_N} = \frac{187,67 \cdot 5,974}{5557,6} = 0,202 \text{ м};$$

$$dL_r = \frac{F_r \cdot SB}{D_N} = \frac{15,99 \cdot 5,974}{5557,6} = 0,017 \text{ м}.$$

5. Рассчитаем длины растянутых первичных строп:

$$SA_e = 5,974 + 0,202 = 6,176 \text{ м};$$

$$SB_e = 5,974 + 0,017 = 5,991 \text{ м}.$$

6. Так как в предельном положении равновесия будет растянута только одна (левая) вторичная стропа ($F_{ls} = P_c$), вычислим ее удлинение:

– по формуле (23) определим константу растяжения вторичной стропы:

$$D_{Ns} = \frac{P_c}{0,046 \cos \gamma} = \frac{160}{0,046} = 3478,3 \text{ тс};$$

– удлинение вторичной стропы будет равно:

$$A_e C_e = AC + \frac{P_c \cdot AC}{D_{NS}} = 7 + \frac{160 \cdot 7}{3478,3} = 7,322 \text{ м.}$$

7. По формулам (24) – (27) вычислим углы μ , ψ первичного подвеса после удлинения строп из-за эластичности:

$$F_\alpha = \frac{1}{2}(SA_e + SB_e + AB) = \frac{1}{2}(6,176 + 5,991 + 8) = 10,0835 \text{ м;}$$

$$m_\alpha = \sqrt{\frac{(F_\alpha - SA_e)(F_\alpha - SB_e)(F_\alpha - AB)}{F_\alpha}} =$$

$$= \sqrt{\frac{(10,0835 - 6,176)(10,0835 - 5,991)(10,0835 - 8)}{10,0835}} = 1,8176;$$

$$\mu = 2 \arctg \left(\frac{m_\alpha}{F_\alpha - SB_e} \right) = 2 \arctg \left(\frac{1,8176}{4,0925} \right) = 47,90^\circ;$$

$$\psi = 2 \arctg \left(\frac{m_\alpha}{F_\alpha - SA_e} \right) = 2 \arctg \left(\frac{1,8176}{3,9075} \right) = 49,90^\circ.$$

8. По формуле (12) вычислим угол отклонения траверсы AB в предельном положении равновесия при растянутых (эластичных) стропях:

$$\operatorname{tg} \alpha_m = \operatorname{ctg} \mu - \frac{P}{2(P_c + p)} \cdot (\operatorname{ctg} \psi + \operatorname{ctg} \mu) =$$

$$= \operatorname{ctg} 47,90^\circ - \frac{30}{2(160 + 30)} \cdot (\operatorname{ctg} 49,90^\circ + \operatorname{ctg} 47,90^\circ) =$$

$$= 0,9036 - 0,07895(0,8421 + 0,9036) = 0,7632;$$

$$\alpha_m = \arctg 0,9085 = 37,35^\circ.$$

9. По формулам (28) и (29) рассчитаем отрезок $B_e C_e$ и угол θ_1 :

$$B_e C_e = \sqrt{(2b)^2 + A_e C_e^2 + 2b \cdot A_e C_e \sin \alpha_m} =$$

$$= \sqrt{8^2 + 7,322^2 + 2 \cdot 8 \cdot 7,322 \sin 37,35^\circ} = 13,74 \text{ м;}$$

$$\theta_1 = \arcsin \left(\frac{2b}{B_e C_e} \cos \alpha_m \right) = \arcsin \left(\frac{8}{13,74} \cos 37,35^\circ \right) = 27,57^\circ.$$

10. По формулам (30) – (32) вычислим угол θ_2 :

$$F_\theta = \frac{1}{2}(B_e C_e + r + CD) = \frac{1}{2}(13,74 + 7 + 8) = 14,37 \text{ м;}$$

$$m_\theta = \sqrt{\frac{(F_\theta - B_e C_e)(F_\theta - r)(F_\theta - CD)}{F_\theta}} =$$

$$= \sqrt{\frac{(14,37 - 13,74)(14,37 - 7)(14,37 - 8)}{14,37}} = 1,4346;$$

$$\theta_2 = 2 \arctg \left(\frac{m_\theta}{F_\theta - r} \right) = 2 \arctg \left(\frac{1,4346}{7,37} \right) = 22,03^\circ.$$

11. Тогда угол в основании ТБ составит

$$\theta = \theta_1 + \theta_2 = 27,57 + 22,03 = 49,60^\circ.$$

12. Высота ТБ будет равна

$$z_m = \frac{CD}{2} \operatorname{tg} \theta = \frac{8}{2} \operatorname{tg} 49,60^\circ = 4,70 \text{ м.}$$

Из приведенного примера следует, что высота ТБ составляет 4,70 м. Это значение меньше, чем для такой же СП с нерастяжимыми стропами ($z_m = 5,37$ м [6], [7]). Кроме того, угол отклонения траверсы AB в предельном положении равновесия системы составляет $\alpha_m = 37,35^\circ$, что незначительно больше, чем при нерастяжимых стропах ($\alpha_m = 37,20^\circ$ [6], [7]).

Выводы

1. Для двухзвенной системы подвешивания КТГ с эластичными стропами разработаны аналитические выражения для оценки сил, растягивающих эти стропы в предельном положении равновесия СП. Это позволяет как рассчитать величины удлинения всех строп, так и определить значения углов между отдельными элементами системы подвешивания КТГ.

2. Получены также аналитические зависимости, позволяющие рассчитать предельный угол α_m отклонения траверсы AB , а также высоту ТБ, в котором должен находиться ЦТ груза, чтобы система (после ее подвешивания), оставалась в устойчивом положении равновесия. Разработанные при этом формулы и выражения согласуются с полученными ранее в работах [6] – [8] в случае применения нерастяжимых строп.

3. Выполнен сравнительный анализ устойчивости двухзвенной системы подвешивания с эластичными и неэластичными стропами. Показано, что при прочих равных условиях высота и площадь ТБ, а значит, и устойчивость больше в случае применения неэластичных строп.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Kaps H. Stability of Cargo Suspension Arrangements. Transport Information Service (TIS) / H. Kaps. — 2013. — 26 p.
2. Kaps H. Stabilität von Anschlagvorkehrungen / H. Kaps // Schiff & Haffen. — No. 5. — Pp. 56–58.
3. Kaps H. BBC Guideline. Safe Solutions for Project Cargo Operations. Version 1.0 / H. Kaps. — BBC Chartering & Logistics GmbH&Ko, 2009. — 68 p.
4. Leine R. The Historical Development of Classical Stability Concepts: Lagrange, Poisson and Lyapunov Stability / R. Leine // Nonlinear Dynamics. — 2010. — Vol. 59. — Is. 1 – 2. — Pp. 173–182. DOI: 10.1007/s11071-009-9530-z.
5. Тарг С. М. Краткий курс теоретической механики / С. М. Тарг. — М.: Высш. шк., 1986. — 416 с.
6. Nikitin Y. V. Static and tip-over stability analysis of two-chain suspension arrangements for large scale cargo operations / Y. V. Nikitin // WMU Journal of Maritime Affairs. — 2014. — Vol. 13. — Is. 1. — Pp. 101–126. DOI 10.1007/s13437-013-0054-5.
7. Никитин Е. В. Устойчивость двухзвенной системы подвешивания груза с параллельными стропами вторичного подвеса / Е. В. Никитин // Вестник одесского национального морского университета. — 2013. — № 3(39). — С. 156–167.
8. РД 31.11.21.24-96. Правила безопасности морской перевозки КГТ грузов. — СПб.: ЦНИИМФ, 1996. — 20 с.
9. РД 31.40.22-93. Правила разработки рабочей технологической документации на погрузочно-разгрузочные работы в морских портах Российской Федерации. — М., 1993.
10. Никитин Е. В. Анализ устойчивости двухзвенных систем подвешивания крупногабаритных грузов с эластичными стропами вторичного подвеса / Е. В. Никитин // Вісник СевНТУ. — 2014. — № 153. — С. 84–87.
11. Никитин Е. В. Устойчивость комплексных систем подвешивания с эластичными стропами при погрузке/разгрузке тяжеловесных и крупногабаритных грузов / Е. В. Никитин, Е. В. Гембатый // Совер-

шенствование проектирования и эксплуатации морских судов и сооружений: сб. докл. межвуз. науч.-техн. конф. — Севастополь: СевГУ, 2015. — С. 80–84.

12. Бронштейн И. Н. Справочник по математике для инженеров и учащихся втузов / И. Н. Бронштейн, К. А. Семендяев. — М.: Главиздат, 1953. — 608 с.

REFERENCES

1. Kaps, H. *Stability of Cargo Suspension Arrangements. Transport Information Service (TIS)*. 2013.
2. Kaps, H. "Stabilität von Anschlagvorkehrungen." *Schiff&Hafen* 5: 56–58.
3. Kaps, H. *BBC Guideline. Safe Solutions for Project Cargo Operations. Version 1.0*. BBC Chartering & Logistics GmbH & Co, 2009.
4. Leine, Remco I. "The historical development of classical stability concepts: Lagrange, Poisson and Lyapunov stability." *Nonlinear Dynamics* 59.1 (2010): 173–182. DOI: 10.1007/s11071-009-9530-z.
5. Targ, S.M. *Kratkii kurs teoreticheskoi mekhaniki*. M.: Vysshaya shkola, 1986.
6. Nikitin, Yevgeny V. "Static and tip-over stability analysis of two-chain suspension arrangements for large-scale cargo operations." *WMU Journal of Maritime Affairs* 13.1 (2014): 101–126. DOI 10.1007/s13437-013-0054-5.
7. Nikitin, E.V. "Ustoichivost' dvukhzvennoi sistemy podveshivaniya gruza s parallel'nymi stropami vtorichnogo podvesa." *Vestnik odesskogo natsional'nogo morskogo universiteta* 3(39) (2013): 156–167.
8. Russian Federation. Guidance document RD 31.11.21.24-96. *Pravila bezopasnosti morskoi perevozki KGT gruzov*. SPb.: TsNIIMF, 1996.
9. Russian Federation. Guidance document RD 31.40.22-93. *Pravila razrabotki rabochei tekhnologicheskoi dokumentatsii na pogruzochno-razgruzochnye raboty v morskikh portakh Rossiiskoi Federatsii*. M., 1993.
10. Nikitin, Y.V. "Stability analysis of two-chain suspension arrangement with elastic secondary sling for large scale cargo operations." *Visnik SevNTU* 153 (2014): 84–87.
11. Nikitin, E.V., and E.V. Gembaty. "Ustoichivost' kompleksnykh sistem podveshivaniya s elastichnymi stropami pri pogruzke/razgruzke tyazhelovesnykh i krupnogabaritnykh gruzov." *Sovershenstvovanie proektirovaniya i ekspluatatsii morskikh sudov i sooruzhenii: Sb. dokladov mezhvuz. nauchno-tekhn. konf. Sevastopol'*: SevGU, 2015: 80–84.
12. Bronshtein, I.N., and K.A. Semendyaev. *Spravochnik po matematike dlya inzhenerov i uchashchikhsya vtuzov*. M.: Glavizdat, 1953.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Никитин Евгений Васильевич —
доктор технических наук, профессор
Черноморское высшее военно-морское
училище имени П. С. Нахимова
299028, Российская Федерация,
г. Севастополь, ул. Дыбенко, 1
e-mail: yvnik76@yandex.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Nikitin, Yevgeny V. —
Dr. of Technical Sciences, professor
The Black Sea Naval College
named after P. S. Nakhimov
1 Dybenko Str., Sevastopol, 1299028,
Russian Federation
e-mail: yvnik76@yandex.ru

*Статья поступила в редакцию 27 октября 2017 г.
Received: October 27, 2017.*

DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-6-1209-1216

THE CALCULATION OF THE NUMBER OF BULK CONTAINERS IN THE ORGANIZATION OF TRANSSHIPMENT OF BULK CARGOES AT SPECIALIZED BERTH

O. A. Izotov, A. V. Gulyaev

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

The possibility of using specialized bulk containers for handling of bulk cargo on the non-specialized berth on the direct and warehousing variant has been evaluated. The methodology for calculating the necessarily for intra-port mechanization and specialized containers for handling bulk cargo in conditions of berth reversibility for handling of non-traditional cargo was presented. Based on the general reason has been given in the statement, it is suggested that the solution of this time-consuming task has the number of solutions depending on the linear dimensions of the quay and the technical characteristics of the handling equipment. This reveals the possibility of applying traditional regulatory recommendations for the calculation of the number of the park technological equipment and personnel involved in warehouse and cordon operations. These elements of the technological chain of movement of cargo from the rear zone are among the most expensive to implement the proposed scheme of work. It is shown that inaccurate calculation can lead both to non-rational expenses for the purchase of equipment and to economic risks associated with disruptions in the operation of the terminal's transport infrastructure. The authors propose the analytical technique for the operational calculation of resource requirements for warehouse operations, which based on the refined method for assessing the performance of warehousing equipment. The method assumes the analysis and comparison of a single technological cycle of machines for intra-port mechanization when working on different options. Based on the presented methodology, we also consider the calculation of the total number of containers required for the handling of a given cargo flow. The obtained numerical dependencies and the conclusions formed on their basis allow us to draw the main conclusion that the construction of a processing system on non-specialized berths of bulk cargo requires more details, taking into consideration the probabilistic multifactor character of the processes and one of the research directions in the port operating conditions under consideration.

Keywords: transshipment terminal, technology overload, container transportation, bulk cargoes, container terminal.

For citation:

Izotov, Oleg A., and Alexander V. Gulyaev. "The calculation of the number of bulk containers in the organization of transshipment of bulk cargoes at specialized berth." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 9.6 (2017): 1209–1216. DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-6-1209-1216.

УДК 656.029.4

РАСЧЕТ КОЛИЧЕСТВА НАСЫПНЫХ КОНТЕЙНЕРОВ ПРИ ОРГАНИЗАЦИИ ПЕРЕВАЛКИ НАВАЛОЧНЫХ ГРУЗОВ НА НЕСПЕЦИАЛИЗИРОВАННОМ ПРИЧАЛЕ

О. А. Изотов, А. В. Гультяев

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

Произведена оценка возможности применения специализированных насыпных контейнеров для перегрузки навалочных грузов на неспециализированном причале по прямому и складскому варианту. Представлена методика расчета потребности внутрипортовой механизации и специализированных контейнеров для перегрузки навалочных грузов в условиях обратимости причала для перегрузки не традиционных для него грузов. В качестве гипотезы выдвинуто предположение о том, что задача имеет ряд решений, за-

висящих от линейных размеров причала и технических характеристик перегрузочного оборудования. Это выявляет возможность применения традиционных нормативных рекомендаций по расчету численности парка технологического оборудования и персонала, вовлеченного в складские и кордонные операции. Данные элементы технологической цепочки перемещения груза из тыловой зоны являются одними из самых затратных для осуществления предложенной схемы работ. Показано, что оптимизационная численная постановка задачи ведет к снижению нерациональных затрат на закупку оборудования, а также к уменьшению рисков, связанных со сбоями работы транспортной инфраструктуры терминала. Предложена аналитическая методика оперативного расчета потребности в ресурсах для складских операций, в основе которых находится уточненный метод оценки производительности складировующего оборудования. Этот метод предполагает анализ и сопоставление единичного технологического цикла машин внутривортовой механизации при работе по различным вариантам. На основе представленной методики рассматривается также расчет общего потребного количества контейнеров для перегрузки заданного грузопотока. Полученные численные зависимости и сформированные на их основе выводы позволяют сделать общий вывод о том, что построение системы переработки на неспециализированных причалах навалочных грузов требует большей детализации, учитывающей вероятностный многофакторный характер процессов, и является одним из направлений исследований в рассматриваемых условиях работы портов.

Ключевые слова: перегрузочный терминал, технологии перегрузки, контейнерные перевозки, навалочные грузы, контейнерный терминал.

Для цитирования:

Изотов О. А. Расчет количества насыпных контейнеров при организации перевалки навалочных грузов на неспециализированном причале / О. А. Изотов, А. В. Гуляев // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2017. — Т. 9. — № 6. — С. 1209–1216. DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-6-1209-1216.

Введение

Вопросы перевозки навалочных грузов, в том числе с использованием контейнеров и вагонных кузовов при погрузочных операциях, как и производства погрузочно-разгрузочных работ с навалочными грузами на неспециализированных причалах, являются объектом изучения ряда отечественных и зарубежных исследователей [1] – [3], однако единых рекомендаций по проведению оперативных технологических расчетов пока не существует. В условиях мирового экономического кризиса наблюдается неуклонный рост объема отгрузок навалочных грузов, в частности, минеральных удобрений, из портов Балтийского региона. При этом количество специализированных терминалов, обеспечивающих высокопроизводительную перегрузку рассматриваемых грузов, не так уж и велико. Для освоения нетрадиционного для них грузопотока порты региона вынуждены переориентировать часть неспециализированных причалов и мощностей на работу по новым технологиям [4] – [6]. Так, например, технология перевалки, применяемая «Смарт Балк терминалом» — рис. 1, разработана на основе опыта работы портов Австралии, которые предложили перевалку насыпных грузов с использованием специализированных насыпных контейнеров, обеспечивающих складирование грузов и высокие темпы перегрузки удобрений на морские суда [7], [8].



Рис. 1. Специализированный насыпной контейнер для складирования и перегрузки навалочных грузов

Общая схема работы такова: перевалка навалочных грузов из вагонов в суда производится путем загрузки специализированных контейнеров, транспортировки их к мобильному (универсальному) крану со специальным автоматизированным захватным устройством и высыпания содержимого контейнеров в трюм судна. При этом контейнеры могут использоваться как элементы склада, что позволяет накапливать судовые партии различных грузов и обеспечивает их сохранность.

Методы и материалы

Выполненное исследование показало, что первичной задачей в общей цепочке моделирования работы неспециализированного причала является расчет потребного количества контейнеров, обеспечивающего непрерывную подачу груза под загрузку судна. Решение этой задачи позволит перейти к планированию общей схемы размещения объектов технологического процесса, расчету производительности и пропускной возможности таких объектов, а также вместимости грузовых площадок под контейнеры [9] – [11].

Известен метод оценки пропускной способности причала по формуле

$$\Pi_{\text{сут}} = \frac{Q_c}{t_{\text{гр}} + t_{\text{всп}}}, \quad (1)$$

где Q_c — загрузка судна, т; $t_{\text{всп}}$ — время на вспомогательные операции, сут; $t_{\text{гр}}$ — время, отводимое на грузовые операции, сут, $t_{\text{гр}} = Q_c / N$ (N — интенсивность обработки судна, т/сут (конт./сут)),

$$N = m \cdot P^{\text{кр}}, \quad (2)$$

где m — количество механизированных линий, обслуживающих перегрузку грузов; $P^{\text{кр}}$ — производительность крановой установки, т/сут (конт./сут),

$$P^{\text{кр}} = \sum T_{\text{см}} \cdot \frac{3600}{T_{\text{ц}}^{\text{кр}}} \cdot G_{\text{гр}}^{\text{конт}}, \quad (3)$$

где $T_{\text{см}}$ — продолжительность рабочего времени в течение суток, ч; $T_{\text{ц}}^{\text{кр}}$ — время цикла крана на обработку одного контейнера, с; $G_{\text{гр}}^{\text{конт}}$ — средняя загрузка одного специализированного контейнера, т.

Можно сделать вывод о том, что количество циклов, совершенных краном за час перегрузочных работ, будет равно количеству контейнеров ($K_{\text{конт/ч}}$), которое за тот же промежуток времени необходимо подать на причал для бесперебойной перегрузки грузов:

$$K_{\text{конт/ч}} = \frac{3600}{T_{\text{ц}}^{\text{кр}}}. \quad (4)$$

Далее при организации прямой перегрузки можно было бы рассчитать время цикла работы внутрипортового транспорта по обеспечению подачи контейнеров под загрузку на пункт перевалки с железнодорожного транспорта, а затем к борту судна, а также количество потребных транспортных средств для этой операции. Однако режим работы железнодорожного транспорта, в частности, такая его операция, как подача / уборка вагонов, не позволяет исключить из данной схемы складскую операцию (рис. 2).

Результаты

Как видно из рис. 2, время цикла внутрипортовых транспортных средств, работающих по различным вариантам работ, будет неодинаково. Так, наибольшим будет время работ по прямому варианту ($T_{\text{ц. внутр. трансп.}}^{\text{пр. вар-т}}$). При отсутствии вагонов внутрипортовый транспорт будет работать по варианту склад-судно ($T_{\text{ц. внутр. трансп.}}^{\text{скл. - судно}}$), а при отсутствии судна восполнит складские запасы по варианту вагон – склад ($T_{\text{ц. внутр. трансп.}}^{\text{ваг - скл}}$).

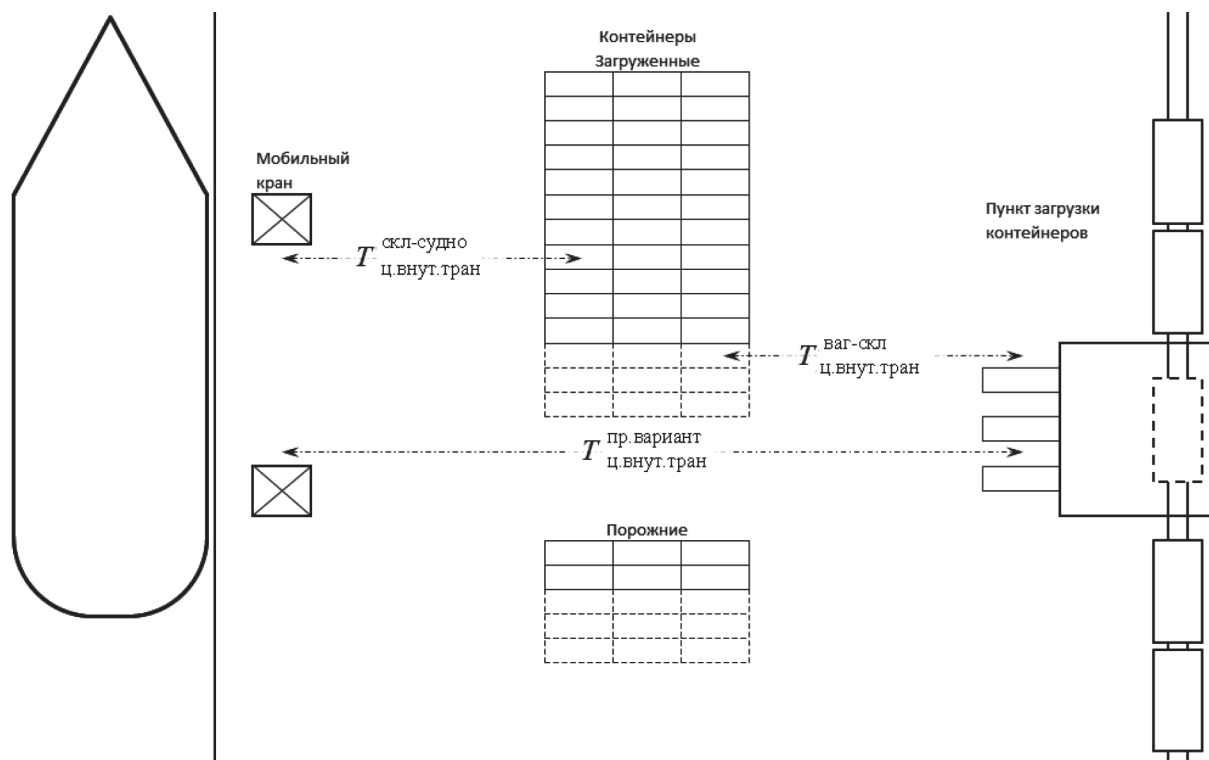


Рис. 2. Общая схема рассматриваемого полигона
(планировка причала при перегрузке навалочных грузов
с применением специализированных контейнеров)

Тогда расчет необходимого количества внутрипортовой механизации может быть выполнен по формуле

$$M_{\text{внутр. трансп}}^{\text{пр. вар-т}} = \frac{P^{\text{кр}}}{P_{\text{пр. вар-т}}}, \quad (5)$$

где $M_{\text{внутр. трансп}}^{\text{пр. вар-т}}$ — количество внутрипортовой механизации, необходимой для организации работ по прямому варианту; $P_{\text{внутр. трансп}}^{\text{пр. вар-т}}$ — производительность единицы внутрипортового транспорта при работе по прямому варианту, конт./сут,

$$P_{\text{внутр. трансп}}^{\text{пр. вар-т}} = \sum T_c \cdot \frac{3600}{T_{\text{пр. вар-т ц. внут. трансп}}} \cdot K_{\text{конт}}^{\text{цикл}}, \quad (6)$$

где $K_{\text{конт}}^{\text{цикл}}$ — количество контейнеров, перевозимых внутрипортовым транспортом за цикл, ед.

Так как производительность единицы внутрипортового транспорта при работе по варианту *склад – судно* ($P_{\text{внутр. трансп}}^{\text{скл-судно}}$) меньше, чем по прямому варианту ($P_{\text{внутр. трансп}}^{\text{пр. вар-т}}$), при отсутствии вагонов часть механизации будет высвобождаться, что не влияет на расчет потребности в контейнерах.

Необходимо отметить, что пропускная способность причала и общее количество контейнеров ($K_{\text{конт}}$), необходимых для бесперебойной обработки судна, имеют разную направленность, но при этом не противоречат друг другу [12], [13]:

$$\begin{cases} \Pi_{\text{сут}} \rightarrow \min; \\ K_{\text{конт}} \rightarrow \max. \end{cases} \quad (7)$$

Безусловно, оптимальным явился бы прямой вариант обработки грузов, когда пропускная способность причала была бы равна пропускной способности пункта перегрузки груза из железнодорожных вагонов в контейнеры ($\Pi_{\text{пункта загр. конт}}$):

$$\Pi_{\text{сут}} \approx \Pi_{\text{пункта загр. конт}} \quad (8)$$

Однако, поскольку по ряду указанных ранее причин это невозможно, для сглаживания неритмичности подачи контейнеров под выгрузку необходимо предусмотреть буферный склад для временного хранения загруженных контейнеров [14], [15]. Для определения вместимости склада, а значит и расчета количества одновременно принимаемых для хранения контейнеров, необходимо определить среднюю продолжительность одного перерыва в подаче вагонов на пункт загрузки контейнеров ($T_{\text{пер. подачи ваг.}}$) и количество таких перерывов ($n_{\text{пер}}$) за время грузовой обработки судна ($t_{\text{гр}}$). Тогда емкость склада в контейнерах можно выразить следующим образом:

$$E_{\text{скл}}^{\text{конт}} = \frac{\Pi_{\text{скл}}^{\text{конт}}}{t_{\text{хр}}^{\text{конт}}} = \frac{\Pi_{\text{скл}}^{\text{конт}}}{t_{\text{гр}} - (T_{\text{пер. подачи ваг.}} \cdot n_{\text{пер}})}, \quad (9)$$

где $\Pi_{\text{скл}}^{\text{конт}}$ — пропускная способность склада, конт./сут.

Если выразить пропускную способность склада через время цикла складского контейнерного перегружателя, получим

$$\Pi_{\text{скл}}^{\text{конт}} = \frac{3600}{T_{\text{ц. перег.}}^{\text{скл}}} \cdot K_{\text{контр}}^{\text{перег}}, \quad (10)$$

$$E_{\text{скл}}^{\text{конт}} = \frac{(24 - (T_{\text{пер. подачи ваг.}} \cdot n_{\text{пер}})) \cdot \left(\frac{3600}{T_{\text{ц. перег.}}^{\text{скл}}} \cdot K_{\text{контр}}^{\text{перег}} \right)}{24} \cdot t_{\text{гр}}. \quad (11)$$

где $T_{\text{ц. перег.}}^{\text{скл}}$ — время цикла складского контейнерного перегружателя, с; $K_{\text{контр}}^{\text{перег}}$ — количество одновременно перегружаемых складским перегружателем контейнеров, ед.

При отсутствии возможности организации прямого варианта обработки вагонов, емкость склада должна соответствовать грузоподъемности судна:

$$E_{\text{скл}}^{\text{конт}} \cdot G_{\text{гр}}^{\text{конт}} = Q_{\text{с}}. \quad (12)$$

Условие бесперебойной обработки судна можно выразить через сопоставление времени цикла оборудования, включенного в одну технологическую линию:

$$T_{\text{ц}}^{\text{кп}} = T_{\text{ц. перег.}}^{\text{скл}}. \quad (13)$$

Таким образом, на момент начала обработки судна, требуемое количество контейнеров можно рассчитать как сумму:

$$K_{\text{конт}} = E_{\text{скл}}^{\text{конт}} + K_{\text{конт}}^{\text{пр. вар-т}} \cdot m, \quad (14)$$

где $K_{\text{конт}}^{\text{пр. вар-т}}$ — количество контейнеров, подаваемых к борту судна по прямому варианту, ед.; m — количество механизированных линий, обслуживающих перегрузку грузов:

$$K_{\text{конт}}^{\text{пр. вар-т}} = M_{\text{внутр. трансп.}}^{\text{пр. вар-т}} \cdot K_{\text{конт}}^{\text{цикл}}. \quad (15)$$

В данном случае при работе по прямому варианту учитывается возможность оборота контейнера и его дальнейшего использования после высвобождения от груза.

Обсуждение

Снижение времени цикла оборудования по вариантам работ, таких как $T_{\text{ц. внутр. трансп.}}^{\text{ваг. - скл}}$ и $T_{\text{ц. внутр. трансп.}}^{\text{пр. вар-т}}$, потребует как минимум сокращения расстояния подвоза груза на причал (L). Анализ моделей показывает справедливость следующих зависимостей:

— с увеличением плеча подвоза увеличивается время цикла и количество оборудования, участвующего в подвозе контейнеров, так как необходимо обеспечить производительность крана, осуществляющего погрузку и норму обработки судна [16] – [18];

– с ростом интенсивности обработки судна (пропускной способности причала), без изменения плеча подвоза, увеличивается количество оборудования, участвующего в подвозе контейнеров по прямому варианту, и общее потребное количество контейнеров, при этом емкость буферного склада остается неизменной (рис. 3);

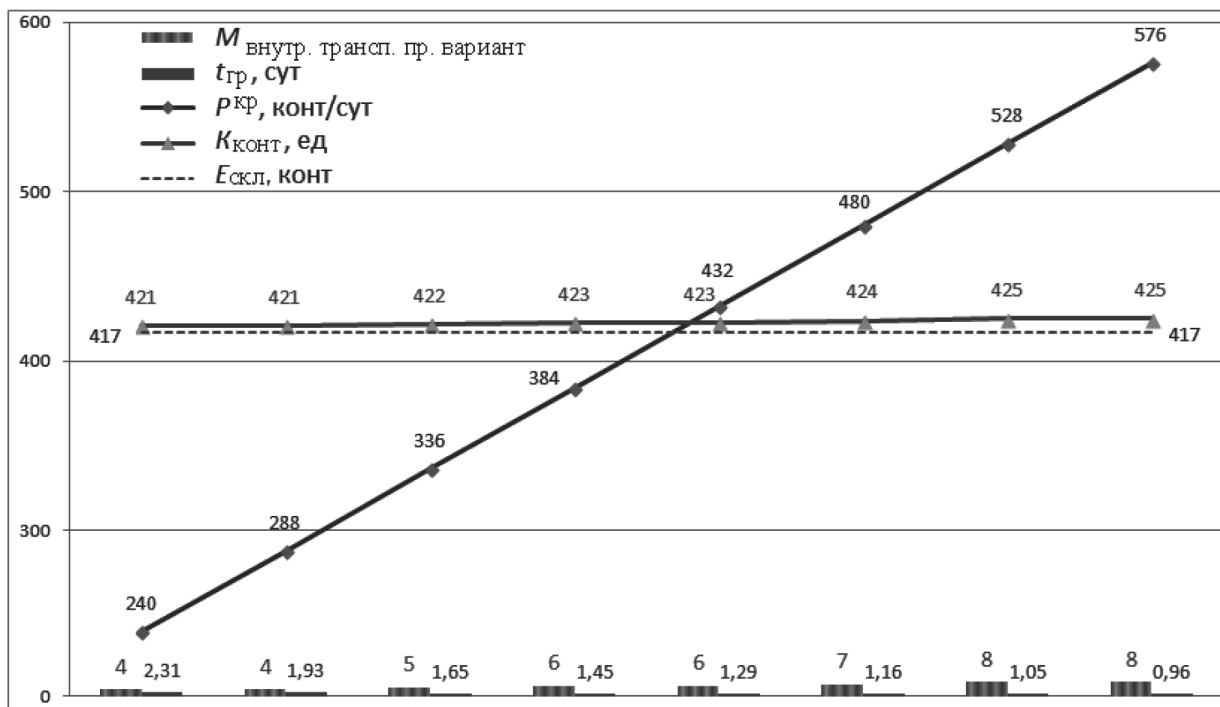


Рис. 3. Зависимость времени обработки судна грузоподъемностью 10000 т от интенсивности обработки судна и расчет емкости склада (в контейнерах) при $L = \text{const}$

– с сокращением расстояния подвоза груза, т. е. размещением склада на причале, произойдет затаривание фронтальной зоны причала, что может негативно сказаться на возможности обратимости причала, т. е. привести к невозможности обработки на данном причале традиционных для него грузов.

Таким образом, принятие рассмотренных технологических решений определяет возможность исключения универсального предназначения причала.

Заключение

Полученные модели позволяют ставить и решать оптимизационную задачу по определению потребности в насыпных контейнерах при различных технологических режимах. Однако полученные численные зависимости показывают, что построение рационально функционирующей в условиях изменяющейся обстановки системы переработки навалочных грузов требует большей детализации, учитывающей вероятностный многофакторный характер процессов и является одним из дальнейших направлений исследований в рассматриваемых условиях работы портов. Аналитические модели могут достоверно отображать лишь условно стационарную ситуацию, а дальнейшее исследование, направленное на получение прогнозных значений, целесообразно проводить, опираясь на методы имитационного моделирования.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Головизнин А. Перевалка сухих минеральных удобрений через морские порты России. Результаты 2015. Проблемы и тренды // «Логистика химического рынка России – ChemoLogic 2016», 21 апреля 2016 г. [Электронный ресурс] / А. Головизнин. — Режим доступа: <http://www.morproekt.ru/publikatsii/989-perevalka>

sukhikh-mineralnykh-udobrenij-cherez-morskie-porty-rossii-rezultaty-2015-problemy-i-trendy.html (дата обращения: 02.10.2017).

2. Bansal T. K. Effect of concrete / T. K. Bansal, M. Sigh, R.B.L. Bed // *Irans. SAEST*. — 1988. — Vol. 23. — № 2 – 3. — Pp. 279–283.

3. Setter N. Mechanical features of chemical shrinkage of cement paste / N. Setter, D. M. Roy // *Cement and Concrete Research*. — 1978. — Vol. 8. — Is. 5. — Pp. 623–634. DOI: 10.1016/0008-8846(78)90045-5.

4. Martin J. The development of generic training material for portworkers in the Dry Bulk Sector: Terminal structures and employment arrangements / J. Martin, H. S. Bang, S. Martin // *The Asian Journal of Shipping and Logistics*. — 2011. — Vol. 27. — Is. 1. — Pp. 31–60. DOI: 10.1016/S2092-5212(11)80002-7.

5. Galvão C. B. The Brazilian seaport system: A post-1990 institutional and economic review / C. B. Galvão, L. T. Robles, L. C. Guerise // *Research in Transportation Business & Management*. — 2013. — Vol. 8. — Pp. 17–29. DOI: 10.1016/j.rtbm.2013.06.006.

6. Кузнецов А. Л. Расчет вместимости портового склада с учетом неравномерности работы смежного транспорта / А. Л. Кузнецов, В. А. Погодин, Я. Б. Спасский // *Эксплуатация морского транспорта*. — 2010. — № 4. — С. 3–9.

7. Скоробогатов В. А. Минеральные удобрения. Перегрузка на портовых терминалах: Справочное пособие / В. А. Скоробогатов. — Таллинн: AS DBT, 2009. — 603 с.

8. Тимошин А. А. Комплексная механизация и автоматизация погрузо-разгрузочных работ / А. А. Тимошин. — М.: Маршрут, 2003. — 400 с.

9. Гуляев А. В. Перспективы освоения экспорта минеральных удобрений портами России (статья на англ. языке) / А. В. Гуляев // *Материалы XV Международной научно-практической конференции «Логистика: современные тенденции развития»: сб. ст. по итогам работы секции «Современные тенденции мировой и отечественной логистики»*. — СПб.: ГУМРФ им. адм. С. О. Макарова, 2016. — С. 40–43.

10. Bandara Y. M. Improving logistics management using foldable/collapsible containers: a case study / Y. M. Bandara, V. Garaniya, C. Chin, Z. H. Leong // *The Asian Journal of Shipping and Logistics*. — 2015. — Vol. 31. — Is. 1. — Pp. 161–185. DOI:10.1016/j.ajsl.2015.03.007.

11. Schepler X. Global planning in a multi-terminal and multi-modal maritime container port / X. Schepler, S. Balev, S. Michel, É. Sanlaville // *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*. — 2017. — Vol. 100. — Pp. 38–62. DOI: 10.1016/j.tre.2016.12.002.

12. Кузнецов А. Л. Классификация и функциональное моделирование эшелонированных контейнерных терминалов / А. Л. Кузнецов, А. В. Кириченко, А. А. Давыденко // *Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова*. — 2015. — № 6 (34). — С. 7–16.

13. Изотов О. А. Организация и технология перегрузочного процесса: учеб.-метод. пособие / О. А. Изотов, А. В. Кириченко, А. Ю. Дьячков, В. А. Никитин. — СПб.: Морской технический колледж, 2015. — Ч. 1. — 518 с.

14. Todd D. Changing technology, economic growth and port development: the transformation of Tianjin / D. Todd // *Geoforum*. — 1994. — Vol. 25. — Is. 3. — Pp. 285–303. DOI: 10.1016/0016-7185(94)90032-9.

15. Park M. 10: International trade / M. Park // *The Fertilizer Industry*. — 2001. — Pp. 10–16.

16. Hoyle B. Inter-port competition in developing countries: an East African case study / B. Hoyle, J. Charlier // *Journal of Transport Geography*. — 1995. — Vol. 3. — Is. 2. — Pp. 87–103. DOI: 10.1016/0966-6923(94)00007-C.

17. Li C. Railway Dry Bulk Container Transport Volume Forecast Method Research / C. Li, J. Lua, J. Liang // *Energy Procedia*. — 2012. — Vol. 17. — Part A. — Pp. 555–560. DOI: 10.1016/j.egypro.2012.02.135.

18. Boumans G. Chapter 5: Unloading and Loading Equipment / G. Boumans // *Developments in Agricultural Engineering*. — 1985. — Vol. 4. — Pp. 207–293.

REFERENCES

1. Goloviznin, A. “Perevalka sukhikh mineral’nykh udobrenii cherez morskie porty Rossii. Rezul’taty 2015. Problemy i trendy.” *«Logistika khimicheskogo rynka Rossii – ChemoLogic 2016»*, 21 aprelya 2016 g. Web. 2 Oct. 2017 <<http://www.morproekt.ru/publikatsii/989-perevalka-sukhikh-mineralnykh-udobrenij-cherez-morskie-porty-rossii-rezultaty-2015-problemy-i-trendy.html>>.

2. Bansal, T. K., M. Sigh, and R.B.L. Bed. “Effect of concrete.” *Irans. SAEST* 23.2-3 (1988): 279–283.

3. Setter, N., and Della M. Roy. “Mechanical features of chemical shrinkage of cement paste.” *Cement and Concrete Research* 8.5 (1978): 623–634. DOI: 10.1016/0008-8846(78)90045-5.

4. Martin, Jeffrey, Hee-Seok Bang, and Sally Martin. "The development of generic training material for port-workers in the Dry Bulk Sector: Terminal structures and employment arrangements." *The Asian Journal of Shipping and Logistics* 27.1 (2011): 31–60. DOI: 10.1016/S2092-5212(11)80002-7.
5. Galvão, Cassia Bömer, Leo Tadeu Robles, and Luciana Cardoso Guerise. "The Brazilian seaport system: A post-1990 institutional and economic review." *Research in Transportation Business & Management* 8 (2013): 17–29. DOI: 10.1016/j.rtbm.2013.06.006.
6. Kuznetsov, A.L., V.A. Pogodin, and Y.B. Spasskiy. "Storage capacity calculation taking into account the irregularity of land transport operations." *Ekspluatatsiya morskogo transporta* 4 (2010): 3–9.
7. Skorobogatov, V.A. *Mineral'nye udobreniya. Peregruzka na portovykh terminalakh: Spravochnoe posobie*. Tallinn: AS DBT, 2009.
8. Timoshin, A. A. *Kompleksnaya mekhanizatsiya i avtomatizatsiya pogrupo-razgruzochnykh rabot*. M: Marshrut, 2003.
9. Gul'tyaev, A. V. "Perspektivy osvoeniya eksporta mineral'nykh udobrenii portami Rossii." *Materialy XV mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii «Logistika: sovremennye tendentsii razvitiya» - Sbornik statei po itogam raboty seksii «Sovremennye tendentsii mirovoi i otechestvennoi logistiki»*. SPb.: GUMRF im. adm. S.O. Makarova, 2016: 40–43.
10. Bandara, Y. M., V. Garaniya, C. Chin, and Z. H. Leong. "Improving logistics management using foldable/collapsible containers: a case study." *The Asian Journal of Shipping and Logistics* 31.1 (2015): 161–185. DOI:10.1016/j.ajsl.2015.03.007.
11. Schepler, X., S. Balev, S. Michel, and É. Sanlaville. "Global planning in a multi-terminal and multi-modal maritime container port." *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review* 100 (2017): 38–62. DOI: 10.1016/j.tre.2016.12.002.
12. Kuznetsov, Aleksandr Lvovich, Aleksandr Viktorovich Kirichenko, and Aleksandr Aleksandrovich Davydenko. "Classification and functional modeling of echeloned container terminals." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova* 6(34) (2015): 7–16.
13. Izotov, O. A., A. V. Kirichenko, A. Yu. D'yachkov, and V. A. Nikitin. *Organizatsiya i tekhnologiya peregruzochnogo protsessa: Uchebno-metodicheskoe posobie*. SPb: Morskoj tekhnicheskii kolledzh, 2015. Part 1.
14. Todd, Daniel. "Changing technology, economic growth and port development: the transformation of Tianjin." *Geoforum* 25.3 (1994): 285–303. DOI: 10.1016/0016-7185(94)90032-9.
15. Park, M. "10: International trade." *The Fertilizer Industry* (2001): 10–16.
16. Hoyle, Brian, and Jacques Charlier. "Inter-port competition in developing countries: an East African case study." *Journal of Transport Geography* 3.2 (1995): 87–103. DOI: 10.1016/0966-6923(94)00007-C.
17. Li, Changhong, Jing Lua, and Jing Liang. "Railway Dry Bulk Container Transport Volume Forecast Method Research." *Energy Procedia* 17 (2012): 555–560. DOI: 10.1016/j.egypro.2012.02.135.
18. Boumans, G. "Chapter 5: Unloading and Loading Equipment." *Developments in Agricultural Engineering* 4 (1985): 207–293.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

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

Гультяев Александр Вадимович — аспирант
Научный руководитель:
Изотов Олег Альбертович
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени
адмирала С. О. Макарова»
198035, Российская Федерация, Санкт-Петербург,
ул. Двинская, 5/7
e-mail: alex_gulyaev@inbox.ru, kaf_pgt@gumrf.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

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

Gulyaev, Alexander V. — Postgraduate
Supervisor:
Izotov, Oleg A.
Admiral Makarov State University
of Maritime and Inland Shipping
5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg,
198035, Russian Federation
e-mail: alex_gulyaev@inbox.ru, kaf_pgt@gumrf.ru

Статья поступила в редакцию 6 октября 2017 г.
Received: October 6, 2017.

ВОДНЫЕ ПУТИ СООБЩЕНИЯ И ГИДРОГРАФИЯ

DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-6-1217-1226

THE INFLUENCE OF THE BERTH LINE CONFIGURATION ON THE SEAPORT PERFORMANCE

A. L. Kuznetsov, G. B. Popov

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

Current seaport and cargo terminal simulation projects allow to estimate the influence that a large number of quantitative factors has on seaports' PPIs (Port Performance Indicators). However, the influence of many qualitative and structural factors, which are hard or impossible to be evaluated, is not clearly expressed in such research projects. The simulation modelling method is considered to be the most suitable for such research. This paper considers the problem of evaluation of the topologically justified mooring restrictions influence on seaport's cargo-handling processes and overall effectiveness. A quantitative evaluation of a seaport's PPIs decrease under conditions of inconvenient berths' disposition is presented. Two options of berth outline is considered: basin and frontal. These options are chosen in accordance with current governing documentation. Port performance evaluation method, based on standard PPIs, is considered. The method uses a ratio based on berth usage for cargo handling operations and total berth usage to evaluate berth usage efficiency. Model animation is recognized as an important method of logical processes visualization. The results of a series of experiments, showing significant influence of a berth line configuration on seaport performance, are reported. Analysis of the collected data allows for the conclusion that seaport's cargo handling capacity drops drastically in response to the berth line configuration shift. It is recognized that the berth line configuration choice is due to many factors, which includes constrained site conditions. It is important, however, to consider the berth line configuration influence on the seaport's PPIs, using the option, allowing to organize the vessel traffic in the most convenient way.

Keywords: simulation modelling, berth line configuration, seaport cargo terminal.

For citation:

Kuznetsov, Aleksander L., and German B. Popov. "The influence of the berth line configuration on the seaport performance." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova* 9.6 (2017): 1217–1226. DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-6-1217-1226.

УДК: 656.6

ВЛИЯНИЕ НАЧЕРТАНИЯ ПРИЧАЛЬНОЙ ЛИНИИ НА ПОКАЗАТЕЛИ ЭФФЕКТИВНОСТИ РАБОТЫ МОРСКОГО ПОРТА

А. А. Кузнецов, Г. Б. Попов

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

Современные разработки в области имитационного моделирования портов и грузовых терминалов позволяют определить влияние множества количественных факторов на показатели эффективности работы морского порта. Однако влияние качественных и структурных факторов, не поддающихся численному выражению, на работу порта в таких работах отражено неявно. Для исследования влияния такого рода факторов наиболее подходит метод имитационного моделирования. В данном исследовании рассматривается проблема оценки влияния ограничений на возможность постановки судна к причалу, вызванная топологическими особенностями местности и, соответственно, на работу порта в целом. Приводится количественная оценка снижения показателей эффективности работы порта при неудобном для постановки и отхода судов расположении причалов. В соответствии с нормативными документами принято два варианта начертания причальной стенки из трех возможных: фронтальный и кошиковый. Предлагается метод оценки работы порта, основанный на стандартных показателях эффективности работы порта. В пред-

ложеном методе используется отношение коэффициента занятости причала только под грузовыми работами к коэффициенту полной занятости причала для оценки эффективности работы причального фронта. Отмечается важность разработки анимированной составляющей модели как способа визуализации логических процессов. Приводятся результаты серии экспериментов, позволяющие сделать вывод о значительном влиянии начертания причальной линии на работу морского порта. Анализ полученных данных свидетельствует о кардинальном снижении пропускной способности морского порта при переходе с одной формы начертания причальной стенки на другую. Отмечается, что при выборе конфигурации причальной стенки играют роль множество факторов, в том числе и стесненные территориальные условия. Однако необходимо также учитывать влияние формы причальной линии на дальнейшие показатели работы порта, используя вариант, позволяющий организовать движение судов наиболее удобным способом.

Ключевые слова: имитационное моделирование, начертание причальной стенки, морской грузовой терминал.

Для цитирования:

Кузнецов А. Л. Влияние начертания причальной линии на показатели эффективности работы морского порта / А. Л. Кузнецов, Г. Б. Попов // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2017. — Т. 9. — № 6. — С. 1217–1226. DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-6-1217-1226.

Введение (Introduction)

В течение нескольких десятилетий метод имитационного моделирования зарекомендовал себя как эффективный способ исследования влияния различных факторов на транспортные системы [1], [2]. Многие существующие модели отражают обширный комплекс факторов, оказывающих влияние на показатели портовой эффективности [3] – [6]. В приведенных исследованиях среди прочих учитывается влияние следующих факторов: внутренней инфраструктуры терминала, расстояний между отдельными грузовыми районами, условий внутрипортового и внешнего трафика, работы таможенных и пограничных органов и т. д. При этом очевидно, что «узкие места», связанные как с недостатком перегрузочных мощностей, так и с нерационально организованными процессами, негативно отражаются на работе порта в целом. Однако в ранее проведенных исследованиях зачастую не отражены конкретные количественные взаимосвязи между конфигурацией морского грузового фронта порта и показателями эффективности его работы. В данном исследовании ставится задача обоснования зависимости длины очереди на рейде морского порта от конфигурации причальной стенки. В рамках данной статьи рассмотрены два варианта начертания причального фронта: *фронтальный* и *ковшовый*. Среди показателей эффективности работы морского порта выбраны показатели длины очереди судов на рейде порта и коэффициент занятости причала.

Методы и материалы (Methods and Materials)

Для решения поставленной задачи был применен метод имитационного моделирования. Средством разработки модели выбрано приложение AnyLogic (USB-ключ #00559). Построена имитационная модель системы, состоящая из пяти причалов. Варианты начертания причальной линии, используемые в процессе моделирования, представлены на рис. 1.

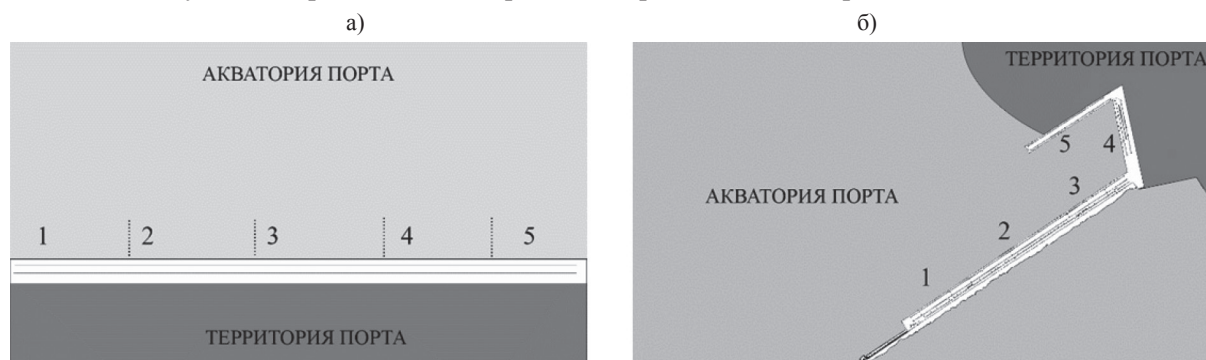


Рис. 1. Начертание причальной линии, использованное при моделировании:

а — фронтальное; б — ковшовое

При конфигурации причальной линии, изображенной на рис. 1, а, постановка судов к любому из пяти причалов не может быть затруднена даже в случае, когда все соседние причалы заняты. В случае, показанном на рис. 1, б, суда, пришвартованные к причалу № 4, не смогут покинуть его до тех пор, пока причалы № 3, 5 и 2 заняты, из-за невозможности работы буксиров. Также суда не смогут пришвартоваться к данному причалу, если указанные ранее причалы заняты, по тем же причинам.

Рассмотрим основные составляющие имитационной модели, базирующейся на описанных принципах.

Логическая структура модели. В процессе разработки модели была спроектирована логическая структура, упрощенно представленная на рис. 2.

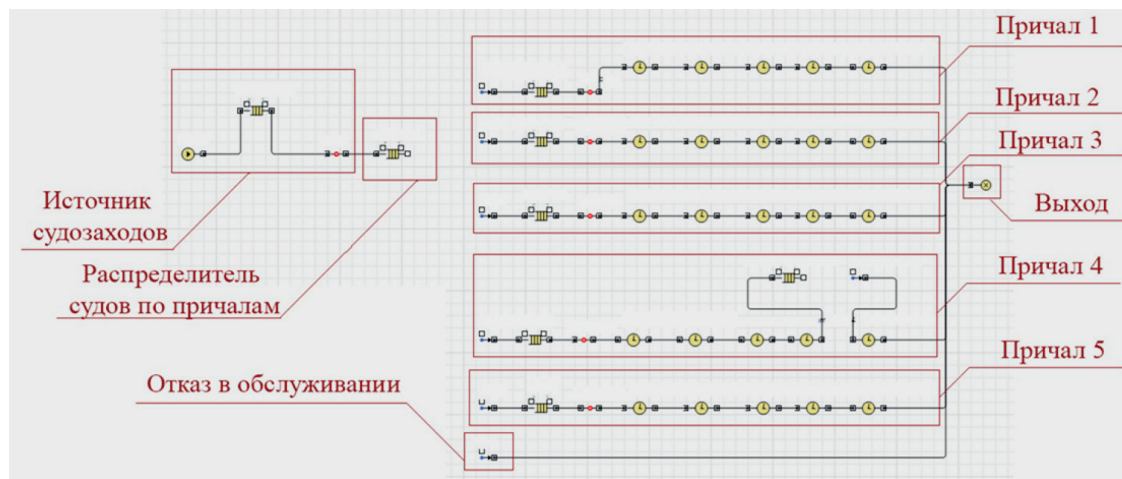


Рис. 2. Упрощенная логическая структура модели

Приведенная логическая структура модели состоит из следующих элементов:

- элемента-источника входящего потока судов;
- элемента-распределителя входящего потока по причалам на основе прогнозируемой занятости причала;
- элементов, определяющих поведение отдельных причалов морского грузового фронта;
- элемента, удаляющего из системы суда, которым отказано в обслуживании;
- элемента выхода из системы.

Предполагается, что входящий поток представлен трамповыми судами. Это означает, что судозаходы осуществляются без фиксированного расписания, а интервал между заходами судов является случайной величиной. Судозаходы генерируются в элементе-источнике с интервалом, распределенным по закону Эрланга 2-го порядка [7].

Линейные размеры судна, дедвейт и размер грузовой партии на борту генерируются случайно в заданных пределах в элементе-источнике. Время стоянки судна в порту складывается из времени, затрачиваемого на погрузочно-разгрузочные работы (ПРР), швартовку и отшвартовку судна, оформление документов до и после грузовых операций. Среднее время, необходимое для выполнения вспомогательных операций, совершаемых в порту, принимается в соответствии с РД 31.3.01.01-93 в зависимости от размера заходящего судна [8]. Моделируемый период равен одному календарному году.

Оценка занятости причалов. Необходимо отметить, что в данном исследовании каждый причал рассматривается дискретно, т. е. как отдельный причальный модуль. Оценка показателя занятости причалов осуществляется на основе коэффициентов занятости [9]. Для выявления природы занятости причала в каждый момент времени коэффициент разделен на два значения: коэффициент занятости причала непосредственно под ПРР (1) и полный коэффициент, рассчитываемый на основе общего времени стоянки судна у причала (2).

Коэффициент занятости причала непосредственно под ПРР определяется по формуле

$$k_{\text{зан}}^{\text{ПРР}} = \frac{t_{\text{зан}}^{\text{ПРР}}}{T}, \quad (1)$$

где $t_{\text{зан}}^{\text{ПРР}}$ — время, затраченное на проведение ПРР на причале; T — время работы модели.

Полный коэффициент $k_{\text{зан}}$, рассчитываемый на основе общего времени стоянки судна у причала, определяется в виде

$$k_{\text{зан}} = \frac{t_{\text{зан}}}{T}, \quad (2)$$

где $t_{\text{зан}}$ — время занятости причала; T — время работы модели.

Коэффициент $k_{\text{зан}}^{\text{ПРР}}$ рассчитывается только во время проведения ПРР на причале. В него не входят вспомогательные операции постановки судна к причалу, швартовки, отшвартовки, оформления документов при заходе и выходе судна из порта, простои судна и т. д.

Подсчет коэффициента $k_{\text{зан}}$ осуществляется с момента начала швартовных операций и до момента окончания отшвартовки и отхода судна от причала. В течение всего времени между двумя этими событиями причал считается занятым судном.

Используя данные коэффициенты, имеется возможность определить *эффективность работы причала* η как отношение полезной работы, выполненной на причале (ПРР), к общему времени занятости причала:

$$\eta = \frac{k_{\text{зан}}^{\text{ПРР}}}{k_{\text{зан}}}. \quad (3)$$

Сравнивая коэффициенты η для одних и тех же причалов при фронтальном и ковшовом расположении, можно определить, насколько один вариант расположения эффективнее другого при прочих равных условиях.

Оценка длины очереди судов на рейде порта. Распределение судов по причалам в порту осуществляется, исходя из расчета ожидаемого времени обработки судна у каждого причала, с учетом характеристик механизации причала. Механизация причала представлена определенным количеством механизированных линий, состоящих из заранее определенного перегрузочного оборудования. Отдельные участки причальной стенки могут не располагать механизированными линиями в связи с их занятостью с помощью выделения этих линий на других участках грузового фронта. В этом случае данный причальный модуль не может заниматься обработкой грузов, постановка судов к нему не осуществляется, а его производительность считается равной нулю.

Приведенный механизм определяет скорость обработки судов у причала, что оказывает влияние на длину очереди на рейде порта. Разместив одинаковое оборудование на соответствующих причалах в случае фронтального и ковшового расположения, имеется возможность сравнить влияние изменения начертания причальной линии на длину очереди судов на рейде морского порта.

Анимация. В отличие от алгоритмических методов программирования, имитационное моделирование носит объектно-ориентированный характер, предполагающий неуправляемое взаимодействие всех элементов системы через установленные связи между ними. Это означает, что отладка модели и проверка её адекватности не может быть осуществлена при помощи детерминированных математических вычислений. В этой ситуации важной составляющей имитационной модели является анимация.

Как известно, анимация программно управляется логической структурой модели [10] — рис. 3. Однако при этом анимационная составляющая играет существенную роль в процессах отладки и калибровки логической составляющей, а именно:

- позволяет выявить явные логические противоречия в моделируемых процессах;
- позволяет проследить корректность изменения и использования переменных;
- позволяет скорректировать значения временных затраты на перемещения грузов, оборудования, техники, судов и т. д.



Рис. 3. Взаимное влияние логической структуры и анимации модели

Как показывают исследования [11], визуализация оказывает значительное влияние на процессы восприятия пользователем информации. Отсутствие анимации как инструмента визуализации усложняет поиск логических и структурных ошибок в работе модели, что может привести к получению некорректных результатов. Важно отметить, что в современном моделировании анимационная составляющая ориентирована в равной степени как на конечного пользователя, так и на непосредственного разработчика модели по причинам, указанным ранее. В связи с этим при проектировании модели было принято решение о необходимости включения механизма визуализации исследуемых процессов.

На рис. 4 приведен пример окна анимации для ковшового начертания причальной линии. В анимации модели выводится окно статуса причалов, в котором отражена завершенность процесса ПРР и возможность постановки и отхода судов от причалов. Из рисунка видно, что судно, поставленное к причалу № 4, не имеет возможности отойти от него из-за занятости причала № 5 и поэтому вынуждено простаивать. Представленная анимация в формате .gif также доступна по ссылке: <https://journal.gumrf.ru/files/upload/art/9-6-1KP.gif>.

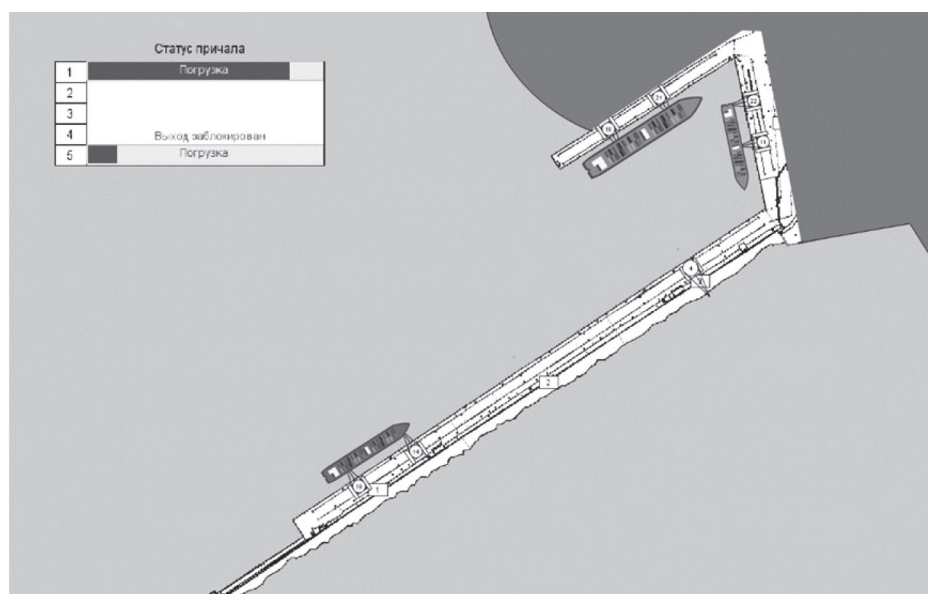
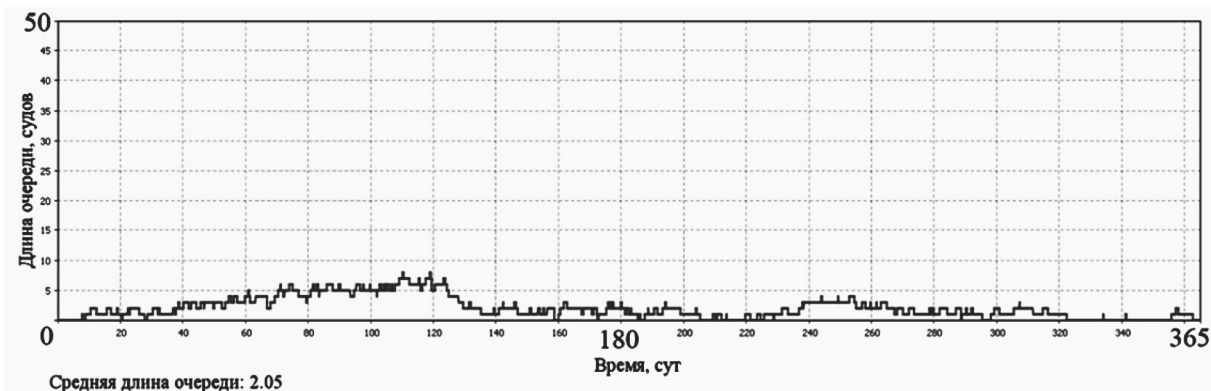


Рис. 4. Пример окна анимации модели

Результаты (Results)

В модели для оценки динамики поведения длины очереди на рейде предусмотрено построение временного графика колебаний длины очереди и гистограммы плотности распределения длины очереди в пределах одного прогона модели. Примеры графиков и гистограмм приведены на рис. 5 и 6. На рис. 6 показана плотность распределения длины очереди судов только при фронтальном начертании, соответствующем рис. 5, а, поскольку в примере, представленном на рис. 5, б, очередь судов на рейде морского порта растет неограниченно, и построение гистограммы для такого случая бессмысленно.

а)



б)

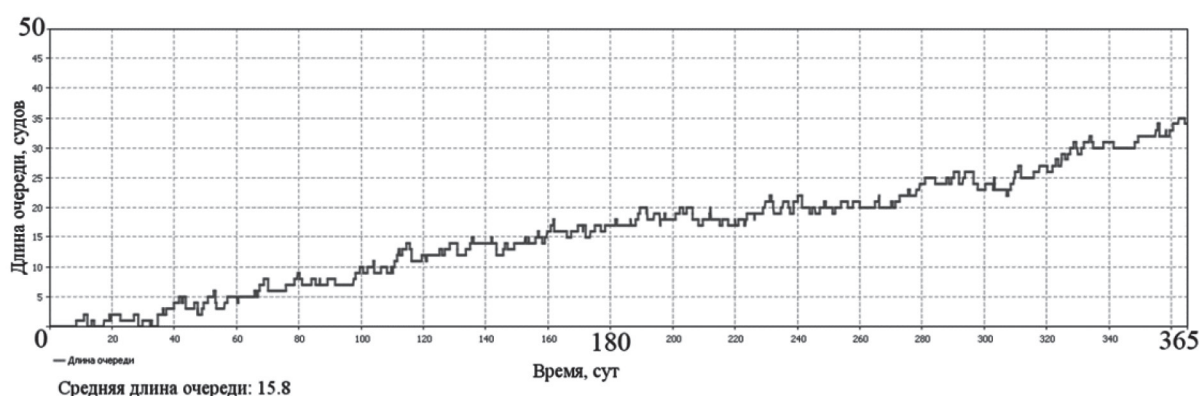


Рис. 5. График изменения длины очереди в течение расчетного периода:
а — при фронтальном начертании; б — при ковшовом начертании

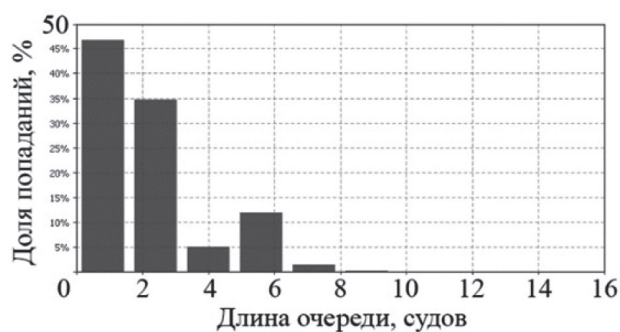


Рис. 6. Плотность распределения длины очереди судов при фронтальном начертании

Также для оценки колебаний значения коэффициентов полной занятости и занятости под ПРР каждого из причалов в течение прогона модели строятся соответствующие временные графики. Поскольку рассмотрение среднего значения коэффициентов занятости по всем причалам не способно корректно отразить влияние ограничений на работу перегрузочного комплекса, изменение данных коэффициентов оценивается отдельно по каждому причалу. Наиболее интересным с этой точки зрения является причал № 4, на деятельность которого оказывают влияние ограничения, накладываемые топологическими особенностями конфигурации порта.

На основе представленных статистических инструментов набора AnyLogic (USB-ключ #00559) возможно получение необходимых данных по показателям эффективности работы морского порта. С этой целью была проведена серия, состоящая из ста экспериментов, для каждо-

го из вариантов расположения причальной линии. Полученные данные показали, что изменение только начертания причальной линии с фронтальной на ковшовую увеличивает длину очереди на рейде морского порта в среднем в 15,1 раз. Кроме того, при ковшовом расположении причалов в 92 % случаев наблюдается неограниченный рост длины очереди, аналогичный приведенному на рис. 5, б, что свидетельствует о том, что морской грузовой фронт не способен справиться с входящим потоком заявок. Эффективность работы η причала № 4 при этом снизилась в среднем в 2,2 раза. Результаты серии экспериментов представлены на рис. 7.

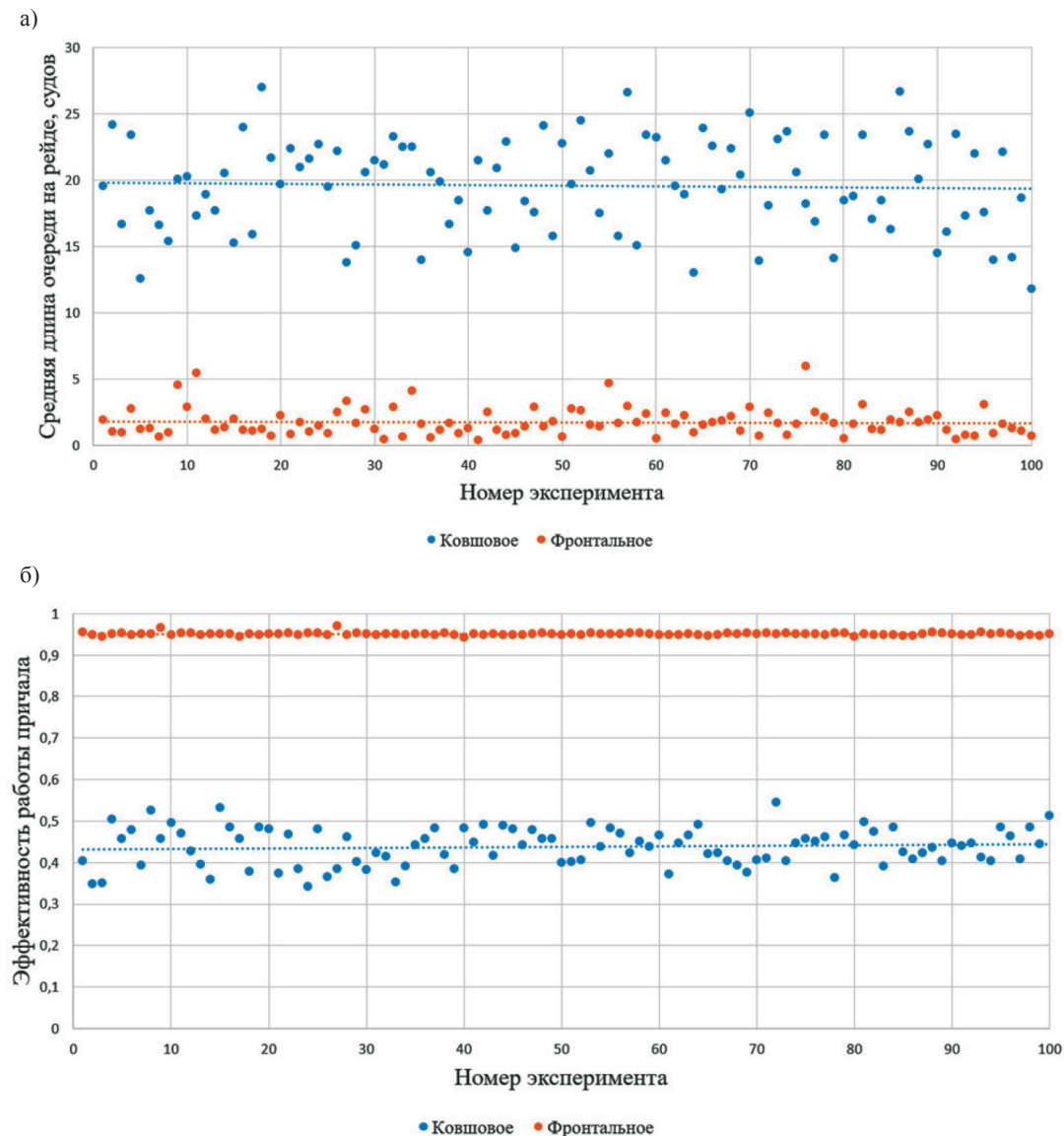


Рис. 7. Результаты серии экспериментов с моделью:

а — среднее значение длины очереди на рейде; б — значение эффективности работы причала

Данные, полученные на основе проведенной серии экспериментов, были проанализированы методами математической статистики. Результаты анализа представлены в следующей таблице:

Среднеквадратическое отклонение показателей работы порта

Исследуемые показатели	Среднеквадратическое отклонение	
	Фронтальное	Ковшовое
Средняя длина очереди судов	1,0451	3,5016
η (для причала № 4)	0,0034	0,0448

Обсуждение (Discussion)

Результаты серии экспериментов на модели показали существенное влияние начертания причальной стенки на показатели работы морского порта. В первую очередь, это отражается на длине очереди судов на рейде порта, демонстрирующей высокую чувствительность к форме причального фронта. Система перегрузочного комплекса переходит из состояния устойчивого равновесия (см. рис. 5, а) в состояние неограниченного роста очереди (см. рис. 5, б) при остальных равных условиях. Данная ситуация свидетельствует о неспособности порта справиться с обработкой одинакового входящего грузопотока при введении дополнительных ограничений, связанных с топологическими особенностями.

Как видно из рис. 7, а, значение длины очереди на рейде морского порта при ковшовом расположении причалов имеет значительно больший разброс, чем при фронтальном. Отсюда можно сделать вывод о том, что помимо увеличения длины очереди на рейде в среднем в 15 раз при изменении начертания причальной линии наблюдается рост и непредсказуемость поведения системы морского грузового фронта. Следовательно, не только факт задержки подхода и отхода судов от причала № 4, «зажатого» между причалами № 3 и 5, но и ее период носят стохастический характер. Это обуславливает затруднения при прогнозировании показателей эффективности работы морского порта.

Из рис. 7, б видно, что значение η для причала № 4 является близким к единице и практически неизменным из опыта в опыт при фронтальном начертании причальной линии. Для такого варианта расположения причалов оно в среднем составило 0,95. Это означает, что 95 % времени занятости причала составляет «полезная» занятость, т. е. занятость причала под ПРР. Такое значение коэффициента η позволяет судить о высокой эффективности работы выбранного причала при фронтальном расположении причальной стенки. Однако при ковшовом варианте начертания причальной линии значение η для причала № 4 значительно ниже и составляет в среднем 0,4374, что более чем в 2 раза ниже эффективности этого же причала при фронтальном расположении. Это означает, что занятость причала грузовыми операциями составляет меньше половины времени общей занятости причала, следовательно, половину времени занятости причал № 4, не способный принимать новые суда и при этом занятый текущим судном, простаивает. Кроме того, эффективность работы этого причала также имеет значительно больший разброс при ковшовом начертании, в отличие от фронтального, что свидетельствует о большой степени непредсказуемости поведения перегрузочной системы морского грузового фронта.

Заключение (Conclusion)

Вопрос влияния формы причальной стенки на показатели эффективности работы морского порта имеет важность, в первую очередь, при проектировании и строительстве новых грузовых площадок и терминалов. В данном исследовании решена задача количественной оценки влияния внутренней структуры морского порта на показатели эффективности его работы. Очевидно, что при проектировании морского грузового терминала учитывается множество различных факторов, которые зачастую диктуют необходимость выбора определенной формы причальной стенки. Однако важно учитывать последствия от выбора конкретной конфигурации и при возможности выбирать вариант, наиболее удобный для организации судоходства в порту.

На основании полученных результатов сделаны следующие выводы.

1. Предложен инструмент оценки влияния начертания причальной линии на показатели эффективности работы морского грузового фронта порта, разработанный при помощи метода имитационного моделирования.
2. Ограничения, накладываемые неудобной конфигурацией причальной стенки, могут оказать существенное влияние на работу морского порта в целом. Эти ограничения не только снижают эффективность работы морского грузового фронта, но и влияют на возможность управления портовыми процессами, снижая их степень предсказуемости.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Sun Z. MicroPort: A general simulation platform for seaport container terminals / Z. Sun, L. H. Lee, E. P. Chew, K. C. Tan // *Advanced Engineering Informatics*. — 2012. — Vol. 26. — Is. 1. — Pp. 80–89. DOI: 10.1016/j.aei.2011.08.010.
2. Howard D. L. PORTSIM 5: Modeling from a seaport level / D. L. Howard, M. J. Bragen, J. F. Burke Jr., R. J. Love // *Mathematical and Computer Modelling*. — 2004. — Vol. 39. — Is. 6–8. — Pp. 715–731. DOI: 10.1016/S0895-7177(04)90550-X.
3. Кузнецов А. Л. Базовая модель логистических потоков через контейнерный терминал / А. Л. Кузнецов, Е. Ю. Козлова // *Эксплуатация морского транспорта*. — 2008. — № 2. — С. 18–20.
4. Кузнецов А. Л. Моделирование сетей контейнерного грузораспределения / А. Л. Кузнецов, С. С. Павленко, В. Н. Щербакова-Слюсаренко // *Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова*. — 2015. — № 5 (33). — С. 33–42. DOI: 10.21821/2309-5180-2015-7-5-33-42.
5. Попов Г. Б. Моделирование ворот морского терминала со стороны автомобильного грузового фронта / Г. Б. Попов // *Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова*. — 2017. — Т. 9. — № 2. — С. 296–305. DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-2-296-305.
6. Özkan E. D. Capacity analysis of RO-RO terminals by using simulation modeling method / E. D. Özkan, S. Nas, N. Güler // *The Asian Journal of Shipping and Logistics*. — 2016. — Vol. 32. — Is. 3. — Pp. 139–147. DOI: 10.1016/j.ajsl.2016.09.002.
7. Measuring and evaluating port performance and productivity. — Geneva: UNCTAD, 1987. — 59 p.
8. РД 31.3.01.01-93. Руководство по технологическому проектированию морских портов. Ч. I. — М.: Союзморниипроект, 1993. — 187 с.
9. Port performance indicators. — Geneva: UNCTAD, 1978. — 24 p.
10. Ermel C. Behavior-Preserving Simulation-to-Animation Model and Rule Transformations / C. Ermel, H. Ehrig // *Electronic Notes in Theoretical Computer Science*. — 2008. — Vol. 213. — Is. 1. — Pp. 55–74. DOI: 10.1016/j.entcs.2008.04.074.
11. Shi N. Effects of visualizing roles of variables with animation and IDE in novice program construction / N. Shi, Z. Min, P. Zhang // *Telematics and Informatics*. — 2017. — Vol. 34. — Is. 5. — Pp. 743–754. DOI: 10.1016/j.tele.2017.02.005.

REFERENCES

1. Sun, Z., L. H. Lee, E. P. Chew, and K. C. Tan. “A general simulation platform for seaport container terminals.” *Advanced Engineering Informatics* 1(26) (2012): 80–89. DOI: 10.1016/j.aei.2011.08.010.
2. Howard, D. L., M. J. Bragen, J. F. Burke Jr., and R. J. Love. “PORTSIM 5: Modeling from a seaport level.” *Mathematical and computer modelling* 39.6-8 (2004): 715–731. DOI: 10.1016/S0895-7177(04)90550-X.
3. Kuznetsov, A. L., and E. Yu. Kozlova. “Base model of logistical flows through container terminal.” *Jek-spluatacija morskogo transporta* 2 (2008): 18–20.
4. Kuznetsov, Alexander Lvovitch, Sergei Sergeyevich Pavlenko, and Victoria Nickolaevna Scherbackova-Slysarenko. “Container distribution networks modeling.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova* 5(33) (2015): 33–42.
5. Popov, German B. “Modelling of marine terminal gate on the side of road transport.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova* 9.2 (2017): 296–305. DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-2-296-305.
6. Özkan, Emin Deniz, Selçuk Nas, and Nil Güler. “Capacity Analysis of Ro-Ro Terminals by Using Simulation Modeling Method.” *The Asian Journal of Shipping and Logistics* 32.3 (2016): 139–147. DOI: 10.1016/j.ajsl.2016.09.002.
7. *Measuring and evaluating port performance and productivity*. Geneva: UNCTAD, 1987.
8. Russian Federation. Guidance document RD 31.3.01.01-93. Guide to Design of Seaports. M.: Soyuzmor-NIIproekt, 1993.
9. *Port performance indicators*. Geneva: UNCTAD, 1978.

10. Ermel, Claudia, and Hartmut Ehrig. "Behavior-Preserving Simulation-to-Animation Model and Rule Transformations." *Electronic Notes in Theoretical Computer Science* 213.1 (2008): 55–74. DOI: 10.1016/j.entcs.2008.04.074.

11. Shi, Nianfeng, Zhiyu Min, and Ping Zhang. "Effects of visualizing roles of variables with animation and IDE in novice program construction." *Telematics and Informatics* 34.5 (2017): 743–754. DOI: 10.1016/j.tele.2017.02.005.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Кузнецов Александр Львович —

доктор технических наук, профессор
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала
С. О. Макарова»

198035, Российская Федерация, г. Санкт-Петербург,
ул. Двинская, 5/7

e-mail: thunder1950@yandex.ru, kaf_pgt@gumrf.ru

Попов Герман Борисович — аспирант

Научный руководитель:

Кузнецов Александр Львович

ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала
С. О. Макарова»

198035, Российская Федерация, г. Санкт-Петербург,
ул. Двинская, 5/7

e-mail: german_bp@mail.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Kuznetsov, Aleksandr L. —

Dr. of Technical Sciences, professor
Admiral Makarov State University of Maritime
and Inland Shipping

5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg, 198035,
Russian Federation

e-mail: thunder1950@yandex.ru, kaf_pgt@gumrf.ru

Popov, German B. — Postgraduate

Supervisor:

Kuznetsov, Aleksandr L.

Admiral Makarov State University of Maritime
and Inland Shipping

5/7 Dvinskaya Str, St. Petersburg, 198035,
Russian Federation

e-mail: german_bp@mail.ru

Статья поступила в редакцию 26 октября 2017 г.

Received: October 26, 2017.

DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-6-1227-1233

FILLING SYSTEM OF LOW-SHIPPING SHIPPING CAMERA CHAMBER FROM SEGMENT LIFTING-GATE DOORS

A. M. Gapeev, K. P. Morgunov, M. K. Karacheva

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

The results of studies of technical and operational parameters of the system for filling the chamber from under segment hoisting and lowering gates are exemplified by the example of the projected low-pressure navigable locks of the Bagaevsky hydroelectric complex. The most widely used in domestic sluice building for low-pressure sluices were the power supply systems of chambers with short bypass galleries located in the heads of the heads, and the power supply system through the holes (wedges) at the gate, overlapped by various types of closures. In these power systems, simple quenching devices were arranged to reduce the flow rate of the flow entering or leaving the lock chamber, or the quench system was completely absent. In the system of filling the chamber, more efficient quenching devices are used, which allow providing safe conditions for parking vessels at the optimum time of the lock. It differs from the system of filling the lock chambers of the Moscow canal with the presence of a screen wall, the culvert below which is made for the entire width of the chamber, the presence of a quench well and a beam distribution grid with a non-uniform height in the pitch of the holes. The dimensions of the culverts and the main elements of the quench chamber are justified by the hydraulic, energy and kinematic parameters of the water flow entering the chamber. The performed studies of the power system under consideration made it possible to obtain quite satisfactory results: the composition of the elements of the filling system ensures effective damping of the energy of the flow at the optimum time of sluicing. In addition, segmental gates are convenient for use in hydraulic conditions. They have low weight, and, consequently, lifting force, as well as smaller amounts of construction and installation work than the system of filling widely used for low-pressure locks through short bypass galleries. The system of filling the chamber from under the segment hoisting and lowering gates can be used in the construction of medium pressure navigable locks, which allow the extinguishing elements to be arranged along the height of the drop wall without the device of a quench well.

Keywords: navigable gateway, supply system, extinguishing devices, segment lifting and lowering gates.

For citation:

Gapeev, Anatolii M., Konstantin P. Morgunov, and Mariya K. Karacheva. "Filling system of low-shipping shipping camera chamber from segment lifting-gate doors." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova* 9.6 (2017): 1227–1233. DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-6-1227-1233.

УДК 626.4:626.421.4.001.2

СИСТЕМА НАПОЛНЕНИЯ КАМЕРЫ НИЗКОНАПОРНОГО СУДОХОДНОГО ШЛЮЗА ИЗ-ПОД СЕГМЕНТНЫХ ПОДЪЕМНО-ОПУСКНЫХ ВОРОТ

А. М. Гапеев, К. П. Моргунов, М. К. Карачева

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

Приводятся результаты исследований технико-эксплуатационных показателей системы наполнения камеры из-под сегментных подъемно-опускных ворот на примере проектируемого низконапорного судоходного шлюза Багаевского гидроузла. Наиболее широкое применение в отечественном шлюзостроении для низконапорных шлюзов получили системы питания камер с короткими обходными галереями, расположенными в устоях голов, и системы питания через отверстия (клинкеты) в воротах, перекрываемые различными типами затворов. В этих системах питания использовались простые гасительные устройства для уменьшения скорости течения потока, поступающего в камеру шлюза или выходящего из неё, либо системы гашения полностью отсутствовали. В рассматриваемой системе наполнения камеры используются более эффективные гасительные устройства, позволяющие обеспечить безопасные условия стоянки

судов при оптимальном времени шлюзования. Данная система отличается от системы наполнения камер шлюзов канала им. Москвы наличием экранной стенки, водопропускное отверстие под которой выполнено на всю ширину камеры, наличием гасительного колодца и балочной распределительной решетки с неравномерным по высоте шагом отверстий. Размеры водопропускных отверстий и основных элементов камеры гашения установлены по гидравлическим, энергетическим и кинематическим параметрам поступающего в камеру потока воды. Выполненные исследования рассматриваемой системы питания позволили получить вполне удовлетворительные результаты: состав элементов системы наполнения обеспечивает эффективное гашение энергии потока при оптимальном времени шлюзования. Кроме того, сегментные ворота удобны для использования по гидравлическим условиям. Они имеют малый вес, а, следовательно, и подъемное усилие, а также меньшие объемы строительно-монтажных работ по сравнению с широко применяемой для низконапорных шлюзов системой наполнения через короткие обходные галереи. Система наполнения камеры из-под сегментных подъемно-опускных ворот может использоваться при строительстве судоходных шлюзов среднего напора, которые позволяют располагать гасительные элементы по высоте стенки падения без устройства гасительного колодца.

Ключевые слова: судоходный шлюз, система питания, гасительные устройства, сегментные подъемно-опускные ворота.

Для цитирования:

Гапеев А. М. Система наполнения камеры низконапорного судоходного шлюза из-под сегментных подъемно-опускных ворот / А. М. Гапеев, К. П. Моргунов, М. К. Карачева // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С.О. Макарова. — 2017. — Т. 9. — № 6. — С. 1227–1233. DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-6-1227-1233.

Введение (Introduction)

Согласно существующей классификации [1], к низконапорным судоходным шлюзам относятся шлюзы с напором на камеру менее 10 м. Они имеют в основном сосредоточенную (головную) систему питания. Наиболее широкое применение в отечественном шлюзостроении получили системы питания с короткими обходными галереями, располагаемыми в устоях голов шлюза, и системы наполнения и опорожнения камер через отверстия (клинкет) в воротах, перекрываемые различными типами затворов. В этих системах питания либо использовались простые гасительные устройства для уменьшения скоростей течения потока воды, поступающего в камеру шлюза или вытекающего из неё, либо гасительные устройства полностью отсутствовали [2], [3]. Поэтому их использование по условиям безопасности шлюзования судов ограничивалось напорами до 3 – 5 м. Использовались и другие системы питания низконапорных шлюзов, конструктивные, строительные и эксплуатационные особенности которых подробно изложены в работах многих авторов [4] – [8].

Обеспечения безопасных условий стоянки в камере шлюза шлюзуемых судов, как показали многочисленные исследования [9], можно достичь за счет использования в системах питания эффективных гасительных устройств: камер гашения, колодцев, балочных решеток, экранов и др. В шлюзах малого напора гасительные элементы могут быть устроены при наличии стенок падения, позволяющих также уменьшить высоту ворот верхней головы. Варианты верхних голов с различными типами ворот при наличии стенки падения рассматривались на стадии проектирования судоходных шлюзов Багаевского гидроузла на Нижнем Дону [10].

В представленной работе рассматриваются технико-эксплуатационные показатели верхней головы низконапорного шлюза с сегментными подъемно-опускными воротами.

Методы и материалы (Methods and Materials)

Гидравлические исследования систем питания выполняются в большинстве случаев на стадии проектирования судоходных шлюзов в лабораторных условиях, краткий обзор которых приведен в работе [9]. Они позволяют определить состав элементов для гашения энергии потока, поступающего в камеру шлюза, и обосновать безопасные режимы шлюзования при пропуске различных типов судов и составов. Разработана также методика определения объема камеры гашения и успокоительного участка камеры шлюза [11], [12].

По существующим в настоящее время методикам определялся состав и основные параметры элементов верхней головы при наполнении камеры низконапорного судоходного шлюза из-под сегментных подъемно-опускных ворот.

Результаты (Results)

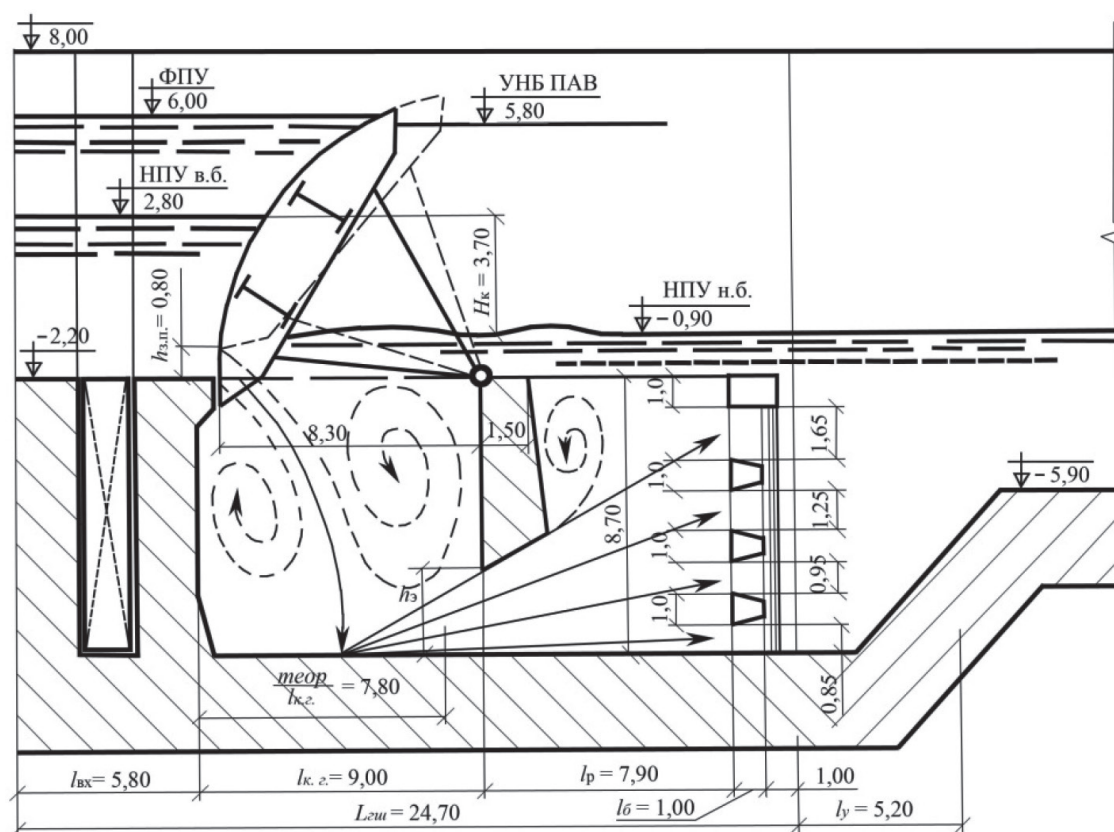


Рис. 1. Верхняя голова шлюза с сегментными подъемно-опускными воротами

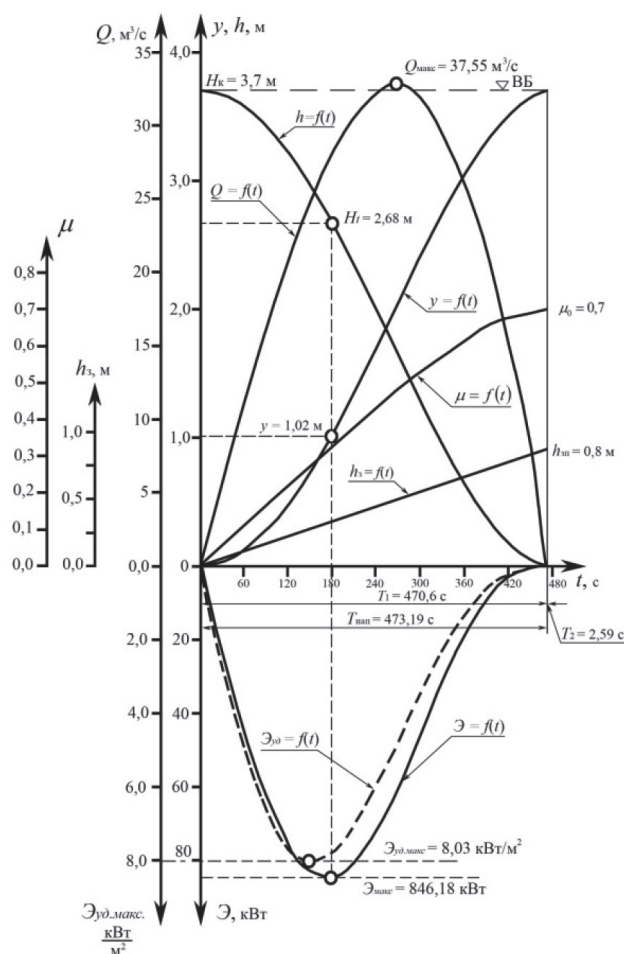


Рис. 2. Гидравлические и энергетические характеристики наполнения камеры шлюза

Основные расчетные параметры системы наполнения приведены в таблице. В ней указаны значения нормативной гидродинамической силы, допустимая по условиям стоянки судна площадь водопропускного отверстия и скорость подъема ворот, длина участков гашения, распределения скорости потока и успокоительного участка, высота водопропускных отверстий под экраном и между балками вертикальной решетки, время наполнения камеры, максимальный расход воды, максимальная полная и удельная энергии потока.

Расчетные параметры системы наполнения

№ п/п.	Наименование параметра	Значение
1	Нормативная гидродинамическая сила P_n , кН	60,00
2	Допустимая площадь водопропускного отверстия при подъеме сегментных ворот ω_0 , м²	13,70
3	Длина участка камеры гашения l_k , м	7,80
4	Высота водопропускного отверстия под экраном h_z , м	2,00
5	Длина участка распределения потока l_p , м	7,90
6	Высота водопропускных отверстий между балками снизу вверх h_i , м	0,85; 0,95; 1,25; 1,65
7	Длина успокоительного участка камеры l_v , м	5,20
8	Допустимая скорость подъема ворот $v_{з.доп}$, м/с	0,0077
9	Время наполнения камеры $T_{нап}$, с (мин)	473,19 (7,89)
10	Максимальный расход воды $Q_{макс}$, м³/с	37,55
11	Максимальная полная энергия потока $\mathcal{E}_{макс}$, кВт	846,18
12	Максимальная удельная энергия потока $\mathcal{E}_{уд. макс}$, кВт/м²	8,03

Обсуждение (Discussion)

При конструировании системы наполнения (см. рис. 1) длина участка гашения потока и высота водопропускного отверстия под экраном приняты несколько больше расчетных значений: $l_k = 9,00$ м вместо 7,80 м по условию размещения сегментных ворот в судоходном положении, а $h_3 = 2,50$ м вместо 2,00 м — по условию направления потока в отверстия вертикальной распределительной решетки.

При полной высоте подъема ворот $h_{3,п} = 0,80$ м падение струи на днище головы обеспечивает примерно посередине длины участка l_k , а направление потока на решетку происходит под максимальным углом около 30° . Площадь водопропускного отверстия под экраном оказалась в 2,55 раза больше площади водопропускного отверстия из-под сегментных ворот $\left(\frac{\omega_3}{\omega_0} = \frac{35,0}{13,7} = 2,55 \right)$, что позволило существенно уменьшить средние скорости потока в сечениях с 2,74 до 1,07 м/с.

В процессе наполнения в камере гашения образуются три вихревых вальца, в которых сосредоточена значительная часть энергии потока: два — на участке от стенки падения до экрана и один — за экраном. Вихревые вальцы у экрана могут вызвать образование водяных бугров над камерой гашения, растекание которых приведет к изменению прямых уклонов водной поверхности в камере шлюза, направленных к нижней голове, а следовательно, и продольных гидродинамических сил, действующих на шлюзуемое судно.

Площадь водопропускных отверстий в вертикальной распределительной решетке получена равной $65,8 \text{ м}^2$, т. е. она в 1,88 раза больше площади водопропускного отверстия под экраном $\left(\frac{\omega_p}{\omega_3} = \frac{65,8}{35,0} = 1,88 \right)$. Средняя скорость потока при выходе в камеру шлюза, полученная равной 0,57 м/с, не должна повлиять на изменения уклонов поверхности воды.

Заключение (Conclusion)

Выполненные исследования рассматриваемой системы наполнения позволили получить вполне удовлетворительные результаты по гидравлическим и кинематическим параметрам потока. Состав элементов системы наполнения является достаточным для эффективного гашения энергии потока, поступающего в камеру шлюза, и по всем показателям не уступает ранее рассмотренным разновидностям систем наполнения для шлюзов Багаевского гидроузла [10]. Кроме того, система наполнения из-под сегментных ворот обладает некоторыми конструктивными и строительными особенностями: небольшим весом ворот, и, следовательно, малым подъемным усилием, меньшим объемом работ по сравнению с системой наполнения с короткими обходными галереями в устоях головы, которая широко применялась для низконапорных шлюзов [15]. Однако наличие опорного узла вращения у ворот, находящегося постоянно под водой в рассматриваемой схеме, накладывает особые требования к воротам по условиям эксплуатации, ремонта и экологии.

Система наполнения камеры из-под сегментных подъемно-опускных ворот может быть широко использована при строительстве судоходных шлюзов среднего напора, которые позволяют располагать гасительные элементы по высоте стенки падения без устройства глубокого колодца.

Качество предлагаемой системы питания необходимо также оценивать на стадии проектирования по условиям стоянки судов в камере шлюза при проведении лабораторных гидравлических исследований [16], которые позволяют обосновать также оптимальные режимы шлюзования различных групп судов, необходимые для разработки автоматизированных систем управления судопропуском.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. СП 101.13330.2012. Актуализированная редакция СНиП 2.06.07-87. Подпорные стены, судоходные шлюзы, рыбопропускные и рыбозащитные сооружения. Нормы проектирования. — М.: Минрегион России, 2012. — 70 с.
2. Михайлов А. В. Гидросооружения водных путей, портов и континентального шельфа. Ч. 1. Внутренние водные пути / А. В. Михайлов. — М.: АСВ, 2004. — 446 с.
3. Семанов Н. А. Судоходные каналы, шлюзы, судоподъемники / Н. А. Семанов, Н. Н. Варламов, В. В. Баланин. — М.: Транспорт, 1970. — 352 с.
4. Хлопенков П. Р. Исследования некоторых систем головного наполнения судоходных шлюзов: дисс. на соискание ученой степени кандидата технических наук / П. Р. Хлопенков. — М.: МИСИ, 1966. — 176 с.
5. Кривошей В. А. Увеличение пропускной способности судоходных шлюзов с головной системой питания: дис. ... д-ра техн. наук / В. А. Кривошей. — СПб.: СПГУВК, 2000. — 232 с.
6. Степанов А. И. Методика гидравлического расчета сложных систем питания судоходных шлюзов: дисс. ... канд. техн. наук / А. И. Степанов. — Л.: ЛИВТ, 1984. — 204 с.
7. Гарибин П. А. Речные судоходные шлюзы (типы шлюзов, системы питания и пропускная способность): учеб. пособие / П. А. Гарибин, С. А. Головкин. — СПб.: Изд-во СПбГПУ, 2009. — 133 с.
8. Рябов Г. Г. Определение параметров системы наполнения судоходного шлюза с дополнительным пуском воды поверх ворот: дисс. ... канд. техн. наук / Г. Г. Рябов. — Новосибирск: НГАСУ, 2013. — 144 с.
9. Гапеев А. М. Системы питания судоходных шлюзов водой / А. М. Гапеев, В. В. Кононов. — СПб.: Изд-во ГУМРФ им. адм. С. О. Макарова, 2013. — 268 с.
10. Гапеев А. М. Исследование вариантов верхней головы проектируемого шлюза Багаевского гидроузла / А. М. Гапеев, Г. Г. Рябов, Т. Ю. Нычик // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2017. — Т. 9. — № 3. — С. 524–536. DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-3-524-536.
11. Михайлов А. В. Головные системы питания судоходных шлюзов и их расчет / А. В. Михайлов. — М.: Минречфлот СССР, 1951. — 172 с.
12. Гапеев А. М. Анализ существующих теоретических исследований по определению размеров водопропускных отверстий, образованных элементами головных систем питания камер судоходных шлюзов // А. М. Гапеев, А. В. Подрешетникова // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2014. — № 4 (26). — С. 95–100.
13. Гапеев А. М. Влияние отдельных элементов верхней головы шлюза на гидравлические параметры потока / А. М. Гапеев // Гидротехнические сооружения и путевые работы на внутренних водных путях для судоходства: сб. тр. — Л.: ЛИВТ, 1984. — С. 148–155.
14. Гапеев А. М. Определение размеров и взаимного расположения элементов системы наполнения камер судоходных шлюзов из-под плоских подъемно-опускных ворот / А. М. Гапеев // Журнал Университета водных коммуникаций. — 2012. — № 2. — С. 34а–40.
15. Гапеев А. М. Факторный анализ головных систем питания судоходных шлюзов / А. М. Гапеев, П. А. Гарибин // Межвуз. сборник научных трудов по гидротехническому и специальному строительству. — М.: МГСУ, 2002. — С. 130–137.
16. Гапеев А. М. Результаты исследований процесса наполнения камеры второй нитки Шекснинского шлюза / А. М. Гапеев, Б. В. Коленко // Технический прогресс в проектировании и эксплуатации водных путей и гидротехнических сооружений: труды. — Л.: Транспорт 1983. — Вып. 176. — С. 48–54.

REFERENCES

1. Russian Federation. Set of Rules SP 101.13330.2012. Aktualizirovannaya redaktsiya SNiP 2.06.07-87. Podpornye steny, sudokhodnye shlyuzy, rybopropusknye i rybozashchitnye sooruzheniya. Normy proektirovaniya. M.: Minregion Rossii, 2012.
2. Mikhailov, A. V. *Gidrosooruzheniya vodnykh putei, portov i kontinental'nogo shel'fa. Chast' 1. Vnutrennie vodnye puti*. M.: ASV, 2004.
3. Semanov, N. A., N. N. Varlamov, and V. V. Balanin. *Sudokhodnye kanaly, shlyuzy, sudopod'emniki*. M.: Transport, 1970.

4. Khlopenkov, P. R. Issledovaniya nekotorykh sistem golovnogo napolneniya sudokhodnykh shlyuzov. PhD diss. M.: MISI, 1966.
5. Krivoshei, V. A. Uvelichenie propusknoi sposobnosti sudokhodnykh shlyuzov s golovnoi sistemoi pitaniya. Dr. diss. SPb.: SPGUVK, 2000.
6. Stepanov, A. I. Metodika gidravlicheskogo rascheta slozhnykh sistem pitaniya sudokhodnykh shlyuzov. PhD diss. L.: LIVT, 1984.
7. Garibin, P. A., and S. A. Golovkov. *Rechnye sudokhodnye shlyuzy (typy shlyuzov, sistemy pitaniya i propusknaya sposobnost')*: *uchebnoe posobie*. SPb.: Izd-vo SPbGPU, 2009.
8. Ryabov, G. G. Opredelenie parametrov sistemy napolneniya sudokhodnogo shlyuza s do-polnitel'nyim puskom vody poverkh vorot. PhD diss. Novosibirsk: NGS, 2013.
9. Gapeev, A. M., and V. V. Kononov. *Sistemy pitaniya sudokhodnykh shlyuzov vodoi*. SPb.: Izd-vo GUMRF imeni admirala S. O. Makarova, 2013.
10. Gapeev, Anatolii M., Georgii G. Ryabov, and Tatyana Yu. Nychik. "Study of options for top head of designed gateway of Bagaevsk waterworks." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova* 9.3 (2017): 524–536. DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-3-524-536.
11. Mikhailov, A. V. *Golovnye sistemy pitaniya sudokhodnykh shlyuzov i ikh raschet*. M.: Minrechflot SSSR, 1951.
12. Gapeev, A. M., and A. V. Podreshetnikova. "Analysis of the existing theoretical researches to determine the dimensions of the culvert openings formed components of the head power systems of the shipping lock's chambers." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova* 4(26) (2014): 95–100.
13. Gapeev, A. M. "Vliyanie otdel'nykh elementov verkhnei golovy shlyuza na gidravlicheskie parametry potoka." *Gidrotekhnicheskie sooruzheniya i putevye raboty na vnutrennikh vodnykh putyakh dlya sudokhodstva: sbornik trudov*. L.: LIVT, 1984: 148–155.
14. Gapeev, A. M. "Opredelenie razmerov i vzaimnogo raspolozheniya elementov sistemy napolneniya kammer sudokhodnykh shlyuzov iz-pod ploskikh pod'emno-opusnykh vorot." *Zhurnal Universiteta vodnykh kommunikatsii* 2 (2012): 34a–40.
15. Gapeev, A. M., and P. A. Garibin. "Faktornyi analiz golovnykh sistem pitaniya sudokhodnykh shlyuzov." *Mezhvuzovskii sb. nauchnykh trudov po gidrotekhnicheskomu i spetsial'nomu stroitel'stvu*. M.: MGSU, 2002: 130–137.
16. Gapeev, A. M., and B. V. Kolenko. "Rezultaty issledovaniya protsessa napolneniya kamery vtoroi nitki Sheksninskogo shlyuza." *Tekhnicheskii progress v proektirovanii i ekspluatatsii vodnykh putei i gidrotekhnicheskikh sooruzhenii: trudy. Vyp. 176*. L.: Transport 1983: 48–54.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Гапеев Анатолий Михайлович —
доктор технических наук, профессор
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени
адмирала С. О. Макарова»
198035, Российская Федерация, г. Санкт-Петербург,
ул. Двинская, 5/7
e-mail: kaf_gsk@gumrf.ru

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

Карачева Мария Константиновна — инженер
ПАО «ПИК-групп»
193230, Российская Федерация, г. Санкт-Петербург,
Дальневосточный пр. 15
e-mail: KarachevaMK@yandex.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Gapeev, Anatolii M. —
Dr. of Technical Sciences, professor
Admiral Makarov State University of
Maritime and Inland Shipping
5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg,
198035, Russian Federation
e-mail: kaf_gsk@gumrf.ru

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

Karacheva, Mariya K. — Engineer
PIK-grupp, JSC
15 Dal'nevostochnyj Av., St. Petersburg,
193230, Russian Federation
e-mail: KarachevaMK@yandex.ru

СУДОСТРОЕНИЕ И СУДОРЕМОНТ

DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-6-1234-1241

INVESTIGATION OF BEHAVIOUR OF COVERS ON STAINLESS MATERIALS IN CONDITIONS OF HIGH CONTACT LOADS

V.V. Veselkov¹, N.V. Lobanov², A.V. Vasilev¹

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

² — Branch of Federal State Educational of Higher Education “Northern (Arctic) Federal
University named after M.V. Lomonosov”, Severodvinsk, Russian Federation

As experience indicated, a specificity of stainless steels, which allowed using in the shipbuilding field, is scoring and seizing on contact and thread surfaces during assembling with low tightening load 0.1 of yield stress instead required min 0.5. The cause leads to non-stabilized tightening of blade-hub joint or insufficient tightening. In this article the task of experimental investigation of behavior of metal covers for stainless steel pairs, which working with high contact loads, was defined. The goal of the investigation - detect the extreme practice tightening load without scoring and seizing during assembling of propeller joints. The test subject is covers of various materials coated on stainless base and a stability of shear of contacting surfaces was researched, because it's proposed that coated material works as a hard-plastic greasing. Boundary magnitudes of loads leading to seizing of stainless steels were discovered, covers and coating methods excluded seizing and working with high contact loads were defined, friction coefficients of covers coated on stainless steel with cool gas-dynamic spatter method were detected. It was established, that most allowable cover for excluding scoring and seizing on contact surfaces of fixed elements of assembling propellers is aluminum cover coated with cool gas-dynamic spatter method, the maximum load on contact surface for the Al-cover is 380 MPa, the magnitude correspond to tightening with 0.55 of material yield stress. It's confirmed, that copper cover may be used also instead aluminum.

Keywords: stainless steels, scoring and seizing, metal covers, cool gas-dynamic spatter method.

For citation:

Veselkov, Vyacheslav V., Nikolai V. Lobanov, and Andrey V. Vasilev. “Investigation of behaviour of covers on stainless materials in conditions of high contact loads.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova* 9.6 (2017): 1234–1241. DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-6-1234-1241.

УДК 621.7-4

ИССЛЕДОВАНИЕ ПОВЕДЕНИЯ ПОКРЫТИЙ НА НЕРЖАВЕЮЩИХ МАТЕРИАЛАХ В УСЛОВИЯХ ВЫСОКИХ КОНТАКТНЫХ НАГРУЗОК

В. В. Веселков¹, Н. В. Лобанов², А. В. Васильев¹

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

² — Филиал ФГАОУ ВО «Северный (Арктический) федеральный университет
Имени М. В. Ломоносова», Северодвинск, Российская Федерация

Как показывает практика, особенностью нержавеющей сталей, допущенных к применению в судовой отрасли, является закусывание и схватывание на контактных и резьбовых поверхностях при сборке даже при невысоких усилиях затяжки 0,1 предела текучести материала при требуемых не менее 0,5 предела текучести, что ведет к нестабильности затяжки соединения лопасть – ступица или недостаточной затяжке. В данной работе поставлена задача экспериментального исследования поведения металлических покрытий для пар трения из нержавеющей высокопрочных сталей, работающих при высоких контактных давлениях. Целью работы является выявление предельных практических усилий затяжки без угрозы появления задиров и схватывания при сборке соединений гребных винтов. Объектом экспериментальных исследований являлось изучение покрытий металлов, нанесенных на нержавеющую основу, и стабильность

сдвига контактирующих поверхностей, исходя из предположения о том, что покрывающий металл «работает» как твердо-пластичная смазка. Определены граничные величины усилий, при которых происходит закусывание нержавеющей материалов, определены покрытия и метод нанесения, исключая закусывание при высоких контактных давлениях, определены коэффициенты трения покрытий, нанесенных методом холодного газодинамического напыления на нержавеющую основу. Установлено, что наиболее приемлемым покрытием для исключения явлений задигов и схватывания на контактных поверхностях элементов крепления гребных винтов является покрытие алюминием, нанесенное холодным газодинамическим методом. Максимальная нагрузка на контактную поверхность для данного покрытия составила 380 МПа, что соответствует затяжке 0,55 от предела текучести материала. Подтверждено, что кроме алюминиевого покрытия допускается использование покрытия медью.

Ключевые слова: нержавеющие стали, закусывание и схватывание, металлические покрытия, метод холодного газодинамического напыления.

Для цитирования:

Веселков В. В. Исследование поведения покрытий на нержавеющих материалах в условиях высоких контактных нагрузок / В. В. Веселков, Н. В. Лобанов, А. В. Васильев // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2017. — Т. 9. — № 6. — С. 1234–1241. DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-6-1234-1241.

Введение

Фланцевые соединения лопасти и ступицы гребных винтов [1] крепятся болтами из высокопрочных нержавеющей сталей с целью противостоять тяжелым условиям циклическо-ударного нагружения. Как показывает практика, особенностью нержавеющей сталей, допущенных к применению в судовой отрасли (для лопасти и ступицы — марок 08X14НДЛ ($\sigma_T/\sigma_B = 500/650$ МПа) или 06X15Н4ДМЛ ($\sigma_T/\sigma_B = 620/790$ МПа), для фиксирующих деталей — марок 14X17Н2 ($\sigma_T/\sigma_B = 540/687$) или 07X16Н4Б ($\sigma_T/\sigma_B = 690/834$ МПа)), является закусывание и схватывание на контактных и резьбовых поверхностях при сборке даже при невысоких усилиях затяжки 0,1 предела текучести материала при требуемых не менее 0,5 σ_T [2], что ведет к нестабильности затяжки соединения *лопасть – ступица* или недостаточной затяжке.

Под нестабильностью затяжки в данной работе понимается прерывание процесса затяжки из-за заедания и закусывания на контактных поверхностях деталей крепления.

Анализ возникновения отказов при сборке выявил следующие причины:

1. Недостаточная точность изготовления крупногабаритных крепежных элементов, ведущая к перекоосу осей скрепляемых деталей [3], [4] из-за особенностей технологии изготовления гребных винтов (рис. 1 и 2).

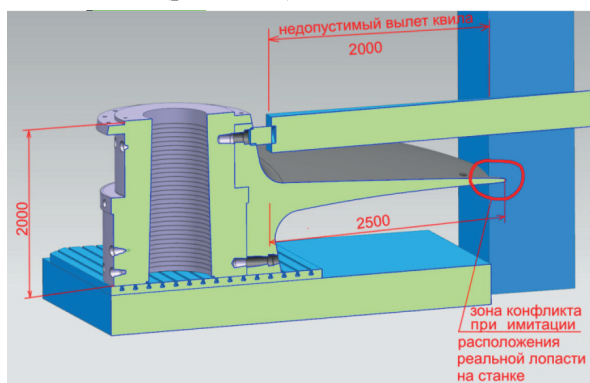


Рис. 1. Совместное растачивание отверстий

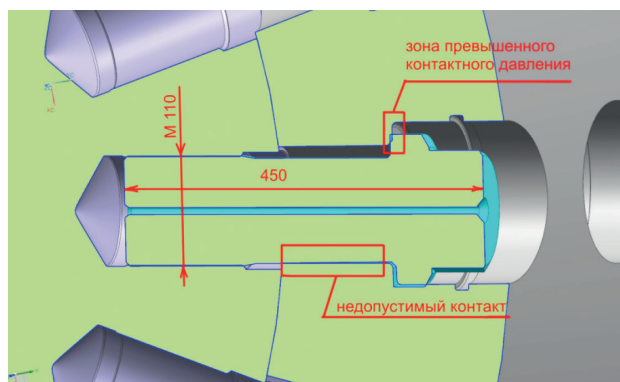


Рис. 2. Зона недопустимых контактов из-за перекоаса осей деталей

2. Особенности поведения покрытий [5] – [7], нанесенных на поверхность нержавеющей материалов.

После апробирования различных способов нанесения покрытий (гальванический, плазменный, газодинамический) выяснилось, что наиболее приемлемым для крепежных элементов греб-

ных винтов является *метод холодного газодинамического напыления* [8], [9] поскольку он исключает термическое и химическое воздействие на крепежный элемент, а также отличается высокой адгезией мягких металлов (Cu, Al, Zn, Pb) к основному материалу — высокопрочной нержавеющей стали.

Для выявления предельных практических усилий затяжки, без угрозы появления задигов и схватывания при сборке соединений гребных винтов, была поставлена задача экспериментального исследования поведения металлических покрытий для пар трения из нержавеющей высокопрочных сталей, «работающих» при высоких контактных давлениях. Объектом исследований являлись покрытия из различных металлов, нанесенных на нержавеющую основу, при этом изучалась стабильность сдвига контактирующих поверхностей, исходя из предположения о том, что покрывающий металл «работает» как твердо-пластичная смазка [10] – [12]. Исследование проводилось на базе оценки коэффициента трения.

Методы и материалы

Для исследований влияния физических свойств покрытия на коэффициент трения был применен специально разработанный стенд на основе измерительных тензодатчиков. Было проведено исследование пары нержавеющей сталей 07X16H4Б-Ш (материал болта) и 08X14HДЛ (материал ступицы гребного винта) при изменяемых параметрах (нормальное давление, угол поворота образцов) и состояниях поверхностей для определения усилий, при которых возникали задиры и появлялось схватывание контактных поверхностей, а также определялись оптимальные сочетания материалов металлических покрытий, исключающих закусывание для нержавеющей сталей.

Исследования проводились согласно схеме эксперимента, показанной на рис. 3. В экспериментах использовали подвижный 1 и неподвижный 2 образцы из испытуемых материалов, имеющие плоские кольцевые поверхности. Нормальное давление создавалось силой N , приложенной к подвижному образцу по оси вращения. Силу N измеряли S -образным тензодатчиком UU-100 кН.

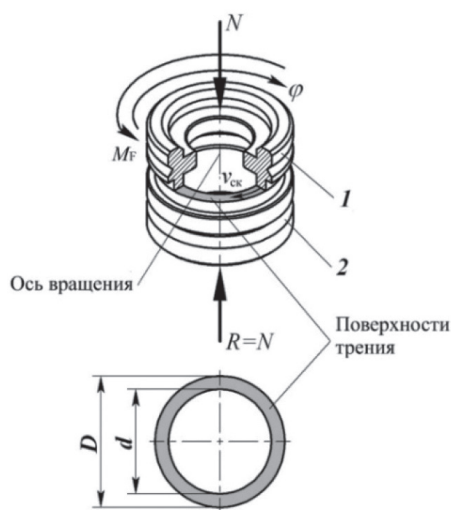


Рис. 3. Схема эксперимента:
1 — подвижный образец;
2 — неподвижный образец

Силу трения измеряли при вращении подвижного образца специально спроектированным моментным ключом на основе тензодатчика U2A-кН трения. Первичные сигналы с тензодатчиков одномоментно регистрировались тензостанцией ZET017-T8 и записывались в виде графиков как функция от пути трения в SCADA-системе ZETView. Среднее расчетное нормальное давление на поверхностях трения определяли по формуле $p_N = N/A_F$.

Коэффициент f_F трения по всей поверхности принимали постоянным. В этом случае момент силы трения относительно оси вращения определялся по формуле $M_F = Nf_F D_F$, откуда $f_F = M_F/(ND_F)$, где $D_F = \frac{2}{3} \left(\frac{D^3 - d^3}{D^2 - d^2} \right)$ — приведенный диаметр сил трения.

Данные из системы ZETView передавались в редактор MSExcel. Получили зависимости расчетного коэффициента трения f_F и среднего нормального давления.

Результаты

В экспериментальном исследовании участвовали подвижные образцы из нержавеющей стали (материал болтов) с механическими характеристиками: $\sigma_{0,2} = 690$ МПа, $\sigma_b = 840$ МПа, неподвижные образцы из нержавеющей стали (материал ступицы) с механическими характеристиками: $\sigma_{0,2} = 510$ МПа, $\sigma_b = 650$ МПа и неподвижные образцы из бронзы (материал ступицы), которые использовались в качестве базы сравнения, так как опыт эксплуатации показал, что меньше всего

отказов по причине «закусывания» возникает при затяжке высоконагруженных резьбовых соединений с болтами из нержавеющей стали и ступицами из бронзы. Использовались пары образцов с покрытием и без и подвижные образцы с покрытием медью (Cu), алюминием (Al) или цинком (Zn), выполненные газодинамическим напылением. Образцы с покрытиями и без испытывались как со смазкой, так и без.

Были реализованы следующие два варианта нагружения.

1-й вариант — при ступенчатом нагружении *A* — повышение давления (имитация реальной затяжки) происходило с шагом 40 МПа (10 ступеней) до расчетных давлений на контактных поверхностях, составляющих для нержавеющей стали — 17 – 240 МПа; для бронзы — 60 – 85 МПа. Путь трения на каждой ступени составлял $S_F = 12 - 15$ мм, что соответствовало повороту головки болта на угол 17–40°. Было выявлено, что реальный путь трения намного больше расчетного и составил 60 – 70 мм, что соответствовало затягиванию болта M100 × 4 на угол ~100°. Увеличенный путь трения объясняется наличием упругих зазоров между контактными поверхностями.

2-й вариант — при постоянном нагружении *B* — давление (70, 140, 227, 370 МПа) прикладывалось сразу и поддерживалось неизменным на всем пути трения для выяснения влияния силы давления и пути трения на условия появления задиров и схватывания. Было выявлено, что максимальный путь трения, без повышения коэффициента трения и без образования задиров (схватывания), составил 150 – 160 мм, т. е. пол-оборота. Типичные результаты экспериментов приведены на графиках (рис. 4).

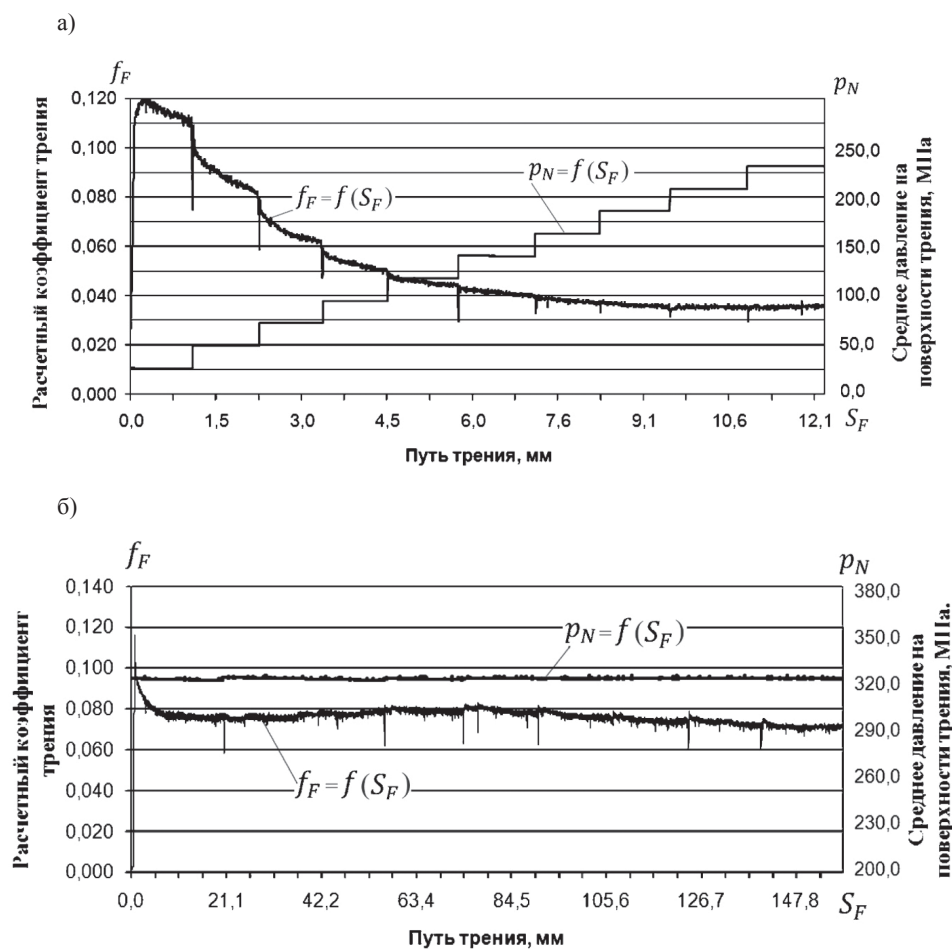


Рис. 4. Графики зависимостей расчетного коэффициента трения, среднего нормального давления на поверхности трения как функции пути трения для пары образцов 08X14НДЛ-07X16Н4Б:

- a* — нагружение *A* (ступенчатое), без покрытия поверхности трения, смазка антизадирая OKS245;
б — нагружение *B* (постоянное), поверхность трения подвижного образца покрыта медью, смазка антизадирая OKS245

Для удобства и наглядности результаты экспериментов сведены в следующую таблицу:

Материалы пары трения	Покры- тие	Смазоч- ный материал	Вид нагру- жения	p_N , МПа	S_F , мм	$f_F \pm 0,01$ (при страгивании)	$f_F \pm 0,005$ (при скольжении)	Схватыва- ние	
07X16H4Б-Ш и БрА9Ж4Н4Мц		Нет	A	<227	<13	0,12 (рывком)	0,100	Нет	
			B	<240	<70	0,13 (рывком)	0,100 – 0,120		
				370	<35	0,10 – 0,11 (рывком)	0,200		
	Нет	OKS 245	A	<240	<13	0,10 – 0,11 (плавно)	0,035 – 0,065	Нет	
			B	70 – 225	18 – 25	0,10 – 0,11 (плавно)	0,055 – 0,065		
					25 – 70	–	0,065		
				370	18 – 25	0,06 – 0,09 (плавно)	0,032 – 0,050		
			25 – 70		–	0,050 – 0,070	Нет		
07X16H4Б-Ш и 08X14НДЛ	Нет	Нет	A	> 40	<13	0,12 (рывком)	0,250	Есть	
		OKS 245		<270	<13	0,10 – 0,12 (плавно)	0,035 – 0,065	Нет	
				270 – 380	8 – 12	0,10 – 0,12 плавно	0,050 – 0,070	Есть	
		OKS 245	B	< 225	20 – 25	0,10 – 0,11 (плавно)	0,055 – 0,065	Нет	
					25 – 70	–	0,100 – 0,130		
		Cu	Нет	A	<370	<13	0,10 – 0,12 (плавно)	0,080 – 0,110	Нет
	B			<227	25 – 40	0,09 – 0,10 (плавно)	0,090 – 0,100		
					70 – 100	–	0,130 – 0,140		
	OKS 245		A	<240	<13	0,12 – 0,13 (плавно)	0,085 – 0,092	Нет	
			B	<340	15–45	0,09 – 0,11 (плавно)	0,060 – 0,080		
					45 – 160	–	0,080		
	Al	Нет	A	<380	8 – 15	0,10 – 0,12 (плавно)	0,065 – 0,090	Нет	
					15 – 23	–	0,090 – 0,120		
				B	<240	12 – 20	0,10 – 0,12 (плавно)		0,065 – 0,080
						20 – 160	–		0,080
		OKS 245	A	<240	<13	0,12 – 0,13 (плавно)	0,070	Нет	
			B	<380	15 – 30	0,10 – 0,11	0,060 – 0,085		
					30 – 150	–	0,085		
	Zn	Нет	A	< 240	10 – 12	0,08 – 0,09 (плавно)	0,070 – 0,080	Нет	
					12 – 30	–	0,120 – 0,140		
					3 – 5	0,10 – 0,13 (плавно)	0,080 – 0,110		
					5 – 18	–	0,200 – 0,230	Есть	
		OKS 245	A		<13	0,01 – 0,11 (плавно)	0,070	Нет	

Обсуждение

По итогам экспериментального исследования установлена следующая взаимосвязь между стабильностью процесса затяжки и состоянием поверхностного слоя.

1. Чем выше создаваемое давление на поверхности резьбы, тем меньший оборот можно сделать при пониженном и стабильном коэффициенте трения.

2. В паре трения сталь по стали без покрытия и смазки схватывание возникает уже при давлении, превышающем 40 МПа, что намного меньше расчетного (170 – 240 МПа) и имеет место на коротком пути трения (поворот болта на 15°), меньшем расчетного в 3 раза. Это подтверждает склонность пары нержавеющей материалов к «схватыванию» и здесь следует отметить возможную существенную «недотяжку» болта до появления момента «схватывания».

3. В паре трения *сталь – бронза* без смазывания и при максимальном давлении 380 МПа схватывание не наблюдалось, хотя в данном случае был существенно превышен предел текучести бронзы (245 МПа).

4. В парах трения *сталь – сталь* с покрытиями Cu и Al со смазыванием и без «схватывания» не наблюдалось. Работа этой пары образцов соответствовала работе пары *сталь – бронза*. При этом покрытие Al имеет меньший коэффициент трения, чем покрытие Cu. Покрытие Cu в реальной паре трения не исключает схватывание. Следовательно, давление в реальных соединениях значительно выше, чем в экспериментальных образцах.

5. Покрытие Zn не исключает схватывания.

6. Резкое страгивание (рывком) наблюдалось только для образцов без покрытий и смазочного материала. Для остальных вариантов коэффициент трения после страгивания плавно снижался до указанного в таблице значения на указанном пути трения и стабилизировался, после чего начинал увеличиваться.

7. Применение смазочного материала [8] снижает коэффициент трения и увеличивает поворот болта в 1,5 – 3 раза, однако момент затяжки реальных болтов не уменьшается.

Заключение

По результатам экспериментального исследования было установлено, что наиболее приемлемым покрытием для исключения явлений задиоров и схватывания на контактных поверхностях элементов крепления гребных винтов является покрытие алюминием, нанесенное холодным газодинамическим методом. Определена максимальная нагрузка на контактную поверхность для данного покрытия — 380 МПа, что соответствует затяжке 0,55 от предела текучести материала. Допускается использование покрытия медью. Определены коэффициенты трения для покрытий, полученных методом холодного газодинамического напыления.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кацман Ф. М. Конструирование винто-рулевых комплексов морских судов / Ф. М. Кацман, Г. М. Кудреватый. — Л.: Судостроение, 1974. — 376 с.
2. Биргер И. А. Резьбовые и фланцевые соединения / И. А. Биргер, Г. Б. Иосилевич. — М.: Машиностроение, 1990. — 368 с.
3. Некрасов А. Я. Схемы контактного нагружения витков винтовых соединений / А. Я. Некрасов, М. О. Арбузов // Вестник МГТУ «Станкин». — 2013. — № 4 (27). — С. 36–41.
4. Муркин С. В. Экспериментально-теоретическое исследование положения оси перекоса резьбового соединения, нагруженного опрокидывающим моментом / С. В. Муркин, А. С. Иванов, М. М. Ермолаев [и др.] // Вестник машиностроения. — 2015. — № 10. — С. 31–34.
5. ГОСТ 9.303-84. Покрытия металлические и неметаллические неорганические. Общие требования к выбору и обозначения. — М.: Изд-во стандартов, 1984. — 75 с.
6. Горячева И. Г. Механика фрикционного взаимодействия: монография / И. Г. Горячева. — М.: Наука, 2001. — 478 с.

7. Шустер Л. Ш. Влияние свойств материала деталей трибосопряжений на их изнашивание / Л. Ш. Шустер, Р. Р. Камалетдинова // Вестник машиностроения. — 2016. — № 7. — С. 50–52.
8. Архипов В.Е. Обработка стали твердыми частицами с использованием газодинамических установок / В. Е. Архипов, А. Ф. Лондарский, А. Ф. Мельшанов [и др.] // Упрочняющие технологии и покрытия. — 2013. — № 9 (105). — С. 7–12.
9. Архипов В. Е. Технологические особенности газодинамического напыления покрытий / В. Е. Архипов, А. Ф. Лондарский, А. Ф. Мельшанов [и др.] // Вестник машиностроения. — 2015. — № 9. — С. 64–69.
10. Зернин М. В. Моделирование контактного взаимодействия с использованием положений механики «контактной псевдосреды» / М. В. Зернин, А. П. Бабин, А. В. Мишин, В. Ю. Бурак // Вестник Брянского государственного технического университета. — 2007. — № 4. — С. 62–72.
11. Матвеевский Р. М. Смазочные материалы. Антифрикционные и противоизносные свойства. Методы испытаний / Р. М. Матвеевский, В. Л. Лашхи, И. А. Буяновский [и др.]. — М.: Машиностроение, 1989. — 224 с.
12. Механика и физика процессов на поверхности и в контакте твердых тел и деталей машин: межвуз. сб. науч. тр. / под ред. Н. Б. Демкина. — Тверь: ТГТУ, 2006. — 232 с.

REFERENCES

1. Katsman, F. M., and G. M. Kudrevaty. *Konstruirovaniye vintov-rulevykh kompleksov morskikh sudov*. L.: Sudostroenie, 1974.
2. Birger, I. A., and G. B. Iosilevich. *Rez'bovyie i flantsevyie soedineniya*. M.: Mashinostroenie, 1990.
3. Nekrasov, Aleksey Yakovlevich, and Mihail Olegovich Arbuzov. "Contact load schemes of threads of coupler-screw and check-screw joints." *Vestnik of MSTU "Stankin"* 4(27) (2013): 36–41.
4. Murkin, S. V., A. S. Ivanov, M. M. Ermolaev, S. K. Rudnev, and M. S. Kuts. "Experimental and theoretical research of skew axis position of threaded joint loaded by tilting moment." *Russian Engineering Research* 10 (2015): 31–34.
5. Russian Federation. State Standard GOST 9.303-84. *Pokrytiya metallicheskie i nemetallicheskie neorganicheskie. Obshchie trebovaniya k vyboru i oboznacheniya*. M.: Izdatel'stvo standartov, 1984.
6. Goryacheva, I. G. *Mekhanika friktsionnogo vzaimodeistviya: monografiya*. M.: Nauka, 2001.
7. Shuster, L. Sh., and R. R. Kamaletdinova. "Influence of material properties of tribocoupling parts on their wear." *Russian Engineering Research* 7 (2016): 50–52.
8. Arkhipov, V. E., A. F. Londarsky, A. F. Melsharov, G. V. Moskvitin, and M.S. Pugachev. "Processing steel hardness particles with use of gasdynamic installations." *Uprochnyayushchie tekhnologii i pokrytiya* 9(105) (2013): 7–12.
9. Arkhipov, V. E., A. F. Londarskiy, A. F. Mel'shanov, G. V. Moskvitin, M. S. Pugachev, and N. S. Falaleev. "Technological features of gas-dynamic spraying of coatings." *Russian Engineering Research* 9 (2015): 64–69.
10. Zernin, M. V., A. P. Babin, A. V. Mishin, and V. Yu. Burak. "Modelirovaniye kontaktnogo vzaimodeistviya s ispol'zovaniem polozhenii mekhaniki «kontaktnoi psevdosredy»." *Vestnik Bryanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* 4 (2007): 62–72.
11. Matveevskii, R. M., V. L. Lashkhi, I. A. Buyanovskii, et al. *Smazochnye materialy. Antifriktsionnye i protivoznosnye svoystva. Metody ispytaniy*. M.: Mashinostroenie, 1989.
12. Demkin, N. B., ed. *Mekhanika i fizika protsessov na poverkhnosti i v kontakte tverdykh tel i detalei mashin: mezhvuz. sb. nauch. tr.* Tver': TGTU, 2006.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Веселков Вячеслав Васильевич —
доктор технических наук, профессор
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала
С. О. Макарова»
198035, Российская Федерация, г. Санкт-Петербург,
ул. Двинская, 5/7
e-mail: VeselkovVV@gumrf.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Veselkov, Vyacheslav V. —
Doctor of Technical Sciences, professor
Admiral Makarov State University of Maritime
and Inland Shipping
5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg, 198035,
Russian Federation
e-mail: VeselkovVV@gumrf.ru

Лобанов Николай Владимирович —

кандидат технических наук, доцент
Филиал ФГАОУВО «Северный (Арктический)
федеральный университет имени
М.В. Ломоносова»

164500, Российская Федерация, г. Северодвинск,
ул. Капитана Воронина, 6
e-mail: sev.kpptto@narfu.ru

Васильев Андрей Владимирович — аспирант
Научный руководитель:

Веселков Вячеслав Васильевич
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени
адмирала С. О. Макарова»
198035, Российская Федерация, г. Санкт-Петербург,
ул. Двинская, 5/7
e-mail: an_vasss@mail.ru, kaf_shipbuilding@gumrf.ru

Lobanov, Nikolai V. —

PhD, associate professor
Branch of Federal State Educational of Higher
Education “Northern (Arctic) Federal University
named after M.V. Lomonosov”

6 Kapitan Voronin Str., Severodvinsk, 164500,
Russian Federation
e-mail: sev.kpptto@narfu.ru

Vasilev, Andrey V. — Postgraduate
Supervisor:

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

*Статья поступила в редакцию 1 ноября 2017 г.
Received: November 1, 2017.*

NATURE OF VISCOSITY-TEMPERATURE DEPENDENCE OF LUBRICATING OILS

Yu. N. Tsvetkov¹, M. Yu. Vlasov², L. I. Dekhtyr¹¹ — Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping,
St. Petersburg, Russian Federation² — Lumex-marketing Ltd, St. Petersburg, Russian Federation

The measurements of lubricating oils viscosity were carried out. The six grades of oils were chosen to investigate: four mineral oils — MS-20, I-40A, I-20A and MVP — and two synthetic polyalphaolefin oils — PAOM-13 and PAOM-4. The viscosity was determined using a rotational device Brookfield LVDV-II+Pro in different temperatures. For the investigated oils the plot of a derivative of viscosity with respect to temperature as a function of temperature turned out to approximate to a unified function close to a linear one. The existence of such a unified dependence follows from the thermal fluctuant nature of viscous flow of oils, that is the sensibility of oil viscosity to a temperature change is determined by the viscosity itself. It was demonstrated that the plot of viscous flow activation energy against viscosity is bounded with two asymptotes — horizontal and vertical ones. The existence of two asymptotes points to the different mechanism of viscous flow of comparatively low-molecular oils as against the high-molecular ones. The presence of horizontal asymptote is an evidence that the viscous flow of comparatively high-molecular oils occurs through sticking and breaking-off of separate structural fragments of neighboring molecules, and activation energy of such oils flow is determined by the energy of rupture of temporary ties between neighboring molecules; these ties are formed in the interaction of the structural fragments, which are kinetically independent structural elements of molecules. The presence of vertical asymptote points to the fact that viscous flow activation energy of the low-molecular oil, the molecule size of which is smaller than the size of structural fragments mentioned above, is determined by the energy necessary to shift the molecules as units relative to each other. Accordingly, the activation energy is determined by the total energy of the ties between the molecules in relative shifting and geometrical factors as well.

Keywords: mineral lubricating oil, polyalphaolefin oil, molecular structure, rotational viscometer, oil viscosity, temperature, activation energy, viscous flow, mechanism of flow, intermolecular interaction.

For citation:

Tsvetkov, Yuriy N., Michail Yu. Vlasov, and Leonid I. Dekhtyr. "Nature of viscosity-temperature dependence of lubricating oils." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova* 9.6 (2017): 1242–1251. DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-6-1242-1251.

УДК 665.76**ПРИРОДА ВЯЗКОСТНО-ТЕМПЕРАТУРНОЙ ЗАВИСИМОСТИ
СМАЗОЧНЫХ МАСЕЛ****Ю. Н. Цветков¹, М. Ю. Власов², Л. И. Дехтярь¹**¹ — ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова»,
Санкт-Петербург, Российская Федерация² — ООО «Люмэкс-маркетинг», Санкт-Петербург, Российская Федерация

Проведены измерения вязкости шести смазочных масел — четырёх масел нефтяного происхождения: МС-20, И-40А, И-20А, МВП, и двух синтетических: ПАОМ-13 и ПАОМ-4. Вязкость масел определяли на ротационном вискозиметре Брукфильда LVDV-II+Pro при различных температурах. Для разных масел зависимость производной вязкости можно аппроксимировать единой функцией, близкой к линейной, что следует из термофлуктуационной природы вязкого течения масел, т. е. чувствительность вязкости к изменению температуры определяется значением самой вязкости. Показано, что зависимость энергии активации вязкого течения от вязкости масел ограничивается двумя асимптотами: горизонтальной и вертикальной. Существование двух асимптот указывает на разный механизм вязкого течения у сравнительно низкомолекулярных масел и сравнительно высокомолекулярных. Наличие горизонтальной асимптоты свидетельствует о том, что вязкое течение сравнительно высокомолекулярных масел происходит

путём прилипания и отрыва отдельных структурных фрагментов между соседними молекулами, и энергия активации течения таких масел определяется энергией разрушения временных узлов между соседними молекулами, образованных взаимодействием структурных фрагментов, которые являются кинетически самостоятельными структурными элементами молекул. Существование вертикальной асимптоты указывает на то, что для низкомолекулярных масел, у которых размеры молекул меньше размера ранее упомянутых структурных фрагментов, энергия активации вязкого течения обусловлена энергией, необходимой для сдвига молекул как единого целого относительно друг друга на определённое расстояние и, соответственно, энергия активации будет определяться суммарной энергией связей между молекулами при их относительном сдвиге, а также геометрическими факторами.

Ключевые слова: минеральное смазочное масло, полиальфаолефиновое масло, молекулярное строение, ротационный вискозиметр, вязкость масла, температура, энергия активации, вязкое течение, механизм течения, межмолекулярное взаимодействие.

Для цитирования:

Цветков Ю. Н. Природа вязкостно-температурной зависимости смазочных масел / Ю. Н. Цветков, М. Ю. Власов, Л. И. Дехтярь // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2017. — Т. 9. — № 6. — С. 1242–1251. DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-6-1242-1251.

Введение

Вязкость смазочного масла является мерой внутреннего трения в нём [1], [2]. От вязкости непосредственно зависят потери на трение при работе узла трения в режиме гидродинамической смазки и косвенным образом, так как вязкость зависит от молекулярной массы масла (потери в узле трения, работающем при граничной смазке). В судовой технике в режиме гидродинамической смазки работают, в частности, опорные подшипники скольжения судовых валопроводов и коленчатых валов судовых дизелей. При решении многих практических вопросов, связанных с выбором масла для указанных узлов трения, а также при рассмотрении теоретических вопросов жидкостной смазки, касающихся решения уравнения Рейнольдса, важно знать насколько изменяется вязкость с изменением температуры, т. е. *индекс вязкости* [2], [3]. Именно индекс вязкости может служить одним из показателей качества масла: чем менее чувствительна вязкость к температуре, тем более качественным считается масло. Вязкость в этом отношении, в отличие от индекса вязкости, является нейтральным показателем, т. е. масла с разной вязкостью имеют одинаковое применение в зависимости от условий гидродинамической смазки, и нельзя по значению вязкости, без привязки к режиму работы, для которого предназначено масло, сделать вывод о том, насколько качественным оно является.

Степень изменения вязкости углеводородных масел с изменением температуры, а также и сама вязкость, зависят от химического состава масла. Количество атомов углерода в молекулах масла, разветвлённость молекулы, а также наличие полярных функциональных групп, участвующих в межмолекулярном взаимодействии, являются определяющими факторами температурной зависимости вязкости масел. Для снижения чувствительности вязкости к изменению температуры в масла (в частности, моторные) добавляют загущающие присадки, количество которых в масле может достигать по массе 5 % и более. Для повышения эффективности таких добавок и обоснованного прогнозирования вязкости смеси углеводородных жидкостей с различными молекулярными массами необходимо проведение численного моделирования вязкости таких смесей [4], а для этого необходимо знать не только механизм взаимодействия между молекулами присадок и базового масла, но и механизм межмолекулярного взаимодействия в самом масле. Для выяснения последнего необходимо исследовать вязкостно-температурную зависимость масла, так как вязкость и вязкостно-температурная зависимость определяются межмолекулярными взаимодействиями в жидкости, и изучение этой зависимости является существенным в понимании взаимодействия между молекулами в жидкостях и их смесях [5], [6]. Однако здесь остаётся ещё много «белых пятен». Изучению зависимости вязкости масел от температуры посвящено много работ, в частности публикации [2], [7], [8], однако в них основной акцент сделан на статистической обработ-

ке вязкостно-температурных зависимостей масел с целью получения универсального уравнения для возможного его применения на практике в широком диапазоне условий эксплуатации без объяснения природы таких зависимостей, что не позволяет использовать их для обоснования путей совершенствования вязкостно-температурных свойств смазочных масел.

Целью работы является исследование природы температурной зависимости вязкости смазочных масел.

Методы и материалы

Испытанию подлежали две группы смазочных масел разного происхождения — четыре минеральных масла: МС-20, И-40А, И-20А, МВП, и два синтетических полиальфаолефиновых: ПАОМ-13 и ПАОМ-4. Контроль масел осуществляли методом инфракрасной (ИК) спектроскопии. ИК-спектры масел регистрировали с помощью инфракрасного фурье-спектрометра «ИнфРАЛЮМ ФТ-02». Степень разветвлённости молекул масел определяли по отношению количества метильных и метиленовых групп. Количество метильных групп CH_3 оценивали по площади S_{1380} пика при волновом числе 1380 см^{-1} , соответствующем деформационным колебаниям групп CH_3 (рис. 1). Количество метиленовых групп CH_2 оценивали по площади S_{720} пика поглощения при 720 см^{-1} , соответствующего маятниковым деформационным колебаниям групп CH_2 [9], [10]. Степень разветвлённости молекул оценивали по отношению площадей указанных пиков.

Для минеральных масел отношение S_{1380}/S_{720} составило примерно 1,9 – 2,1, тогда как для синтетических это отношение оказалось равным 1,0 – 1,2. Сравнительно низкие значения этих показателей указывают на преобладание в исследуемых маслах парафиновых структур н-строения. Более низкие значения отношения S_{1380}/S_{720} для полиальфаолефиновых масел указывают на то, что они имеют более однородную структуру. Действительно, состав минеральных масел представляет собой сложную смесь углеводородов — н-алканов, изоалканов, циклоалканов (нафтенов), алкенов и ароматических соединений, тогда как полиальфаолефиновые масла имеют более однородный состав как с точки зрения молекулярных масс, так и с точки зрения изомерного состава — молекулы полиальфаолефинов имеют линейное строение [11].

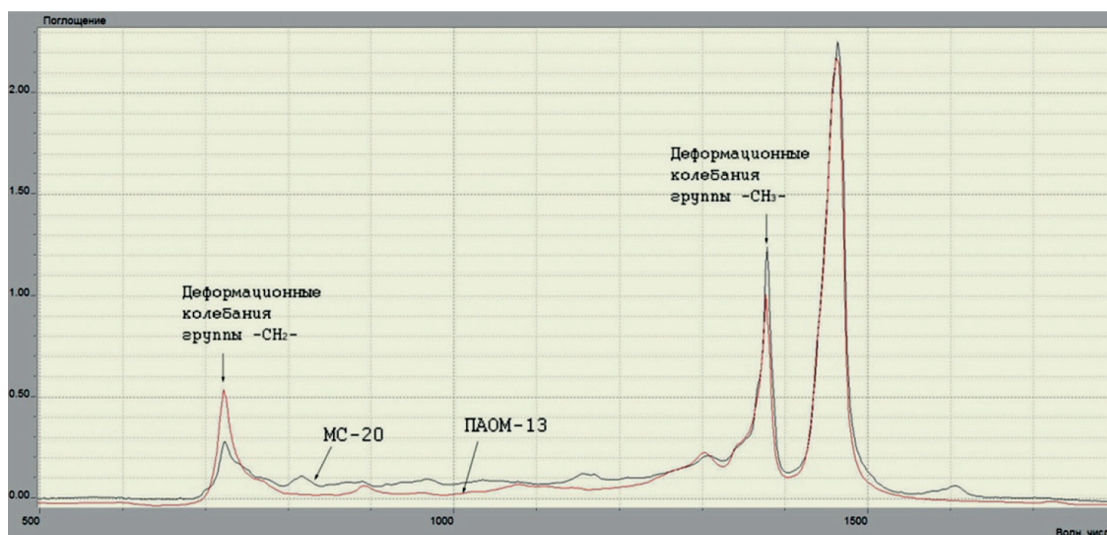


Рис. 1. Пример ИК-спектров минерального и полиальфаолефинового масла

Вязкость масел определяли на ротационном вискозиметре Брукфильда LVDV-II+Pro (рис. 2, а), представляющем собой вискозиметр с контролируемой скоростью сдвига, снабжённый измерительной системой Серле [12]. При испытании каждое масло помещали в термостатируемую ячейку и проводили опыты при четырёх температурных значениях в диапазоне от 25 ... 40 °С до 100 °С и различной скорости вращения шпинделя, что обеспечивало разные скорости

сдвига масла в зазоре ячейки. Вязкость масла регистрировали сначала в процессе увеличения скорости вращения с определёнными интервалами до достижения максимальной скорости вращения, а затем также в процессе снижения скорости до начального значения. Значение вязкости при конкретной температуре принимали равным среднему арифметическому значению, полученному при разной скорости вращения шпинделя.

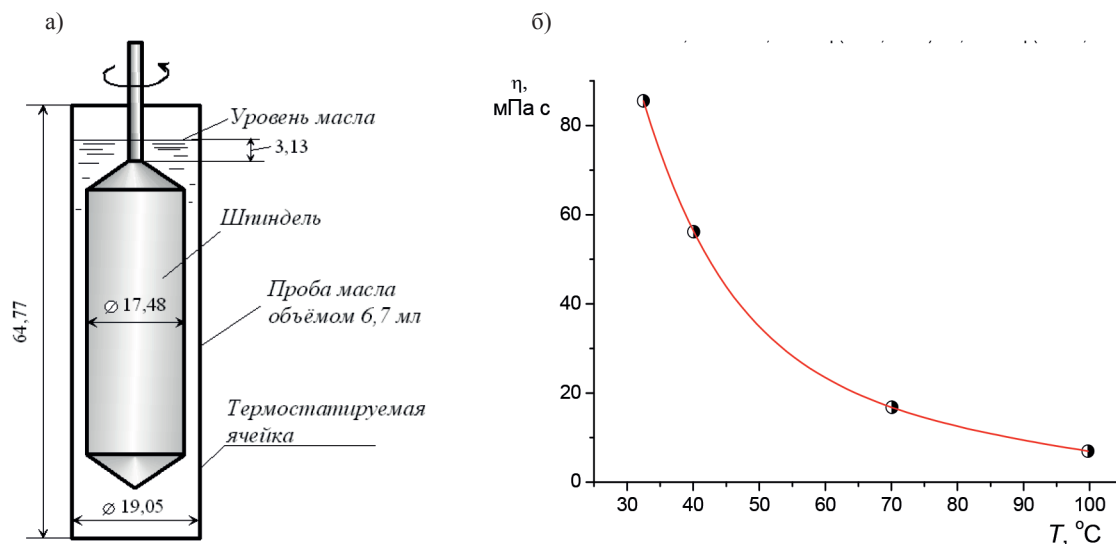


Рис. 2. Схема испытательной ячейки вискозиметра Брукфильда LVDV-II +Pro (а) и пример зависимости вязкости от температуры для масла И-40А (б)

Для каждого масла по четырём точкам аппроксимацией определяли аналитический вид зависимости $\eta(t)$ — рис. 2, б. По найденной аналитической зависимости в диапазоне измерения выбирали восемь-девять точек через семь – девять градусов, в этих точках находили вязкость и производную вязкости по температуре. Затем эти точки использовали для анализа влияния температуры на характеристики вязкости: увеличение таким способом количества точек позволило сделать процесс аппроксимации более наглядным.

Результаты и обсуждение

Как видно из рис. 3, каждое масло подчиняется собственной зависимости вязкости от температуры.

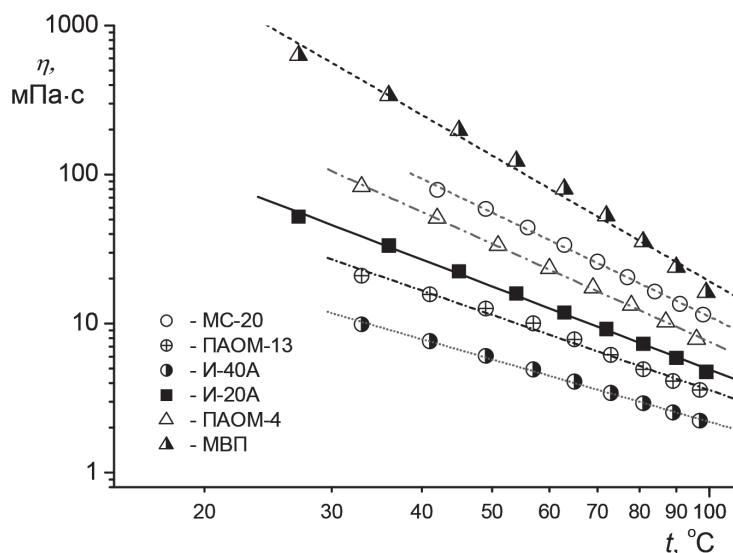


Рис. 3. Зависимости вязкости масел от температуры

Все графики $\eta(t)$, представленные на рис. 3, можно с достаточной точностью (коэффициенты корреляции принимали значения от 0,995 до 0,999) в диапазоне изменения температуры в несколько десятков градусов аппроксимировать степенными зависимостями следующего вида:

$$\eta = \frac{C}{t^n},$$

где C и n — опытные постоянные; t — значение температуры в °С.

Как следует из сопоставления зависимостей на рис. 3, с увеличением вязкости масла растёт ее чувствительность к температуре, что проявляется в увеличении показателя степени n при переменной t : если для масла МВП показатель $n = 1,40$, то для масла МС-20 $n = 2,80$. Это позволило предположить существование единой зависимости $d\eta/dt$ от вязкости η . График производной $d\eta/dt$ в зависимости от вязкости η представлен на рис. 4.

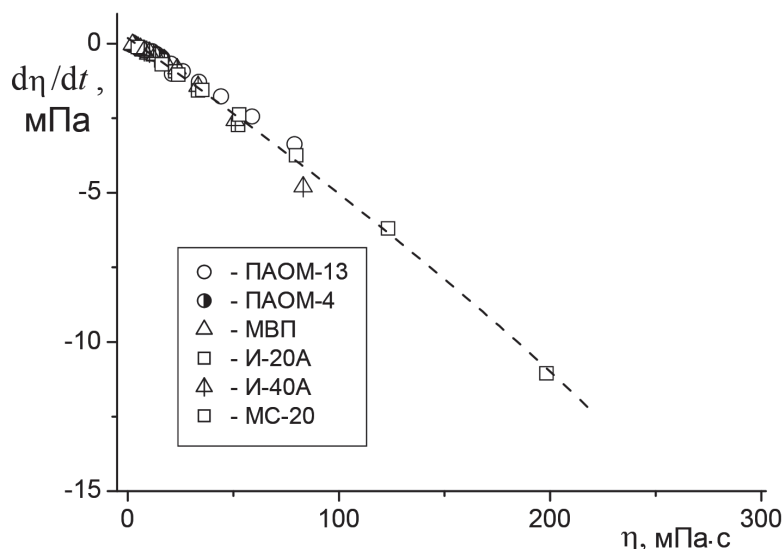


Рис. 4. Зависимость производной вязкости по температуре от вязкости для различных масел

Как видно из рис. 4, действительно, точки для разных масел укладываются в одну зависимость. Необходимо отметить, что существование единой зависимости $d\eta/dt$ от вязкости η было обнаружено ранее в работе [2] и сделан вывод о том, что наиболее важным фактором, влияющим на изменение вязкости от температуры, является сама вязкость, без объяснения причин существования такой зависимости.

По мнению авторов, существование единой зависимости $d\eta/dt$ от вязкости η можно объяснить с учётом известного факта, свидетельствующего о том, что вязкое течение углеводородных масел является термоактивационным процессом, т. е. зависимость вязкости от температуры подчиняется уравнению Аррениуса:

$$\eta = \eta_0 \exp\left(\frac{U}{RT}\right), \quad (1)$$

где U — энергия активация вязкого течения; R — универсальная газовая постоянная, равная 8,314 Дж/(моль·К); T — абсолютная температура.

Представленные на рис. 5 графики зависимости вязкости η от обратного значения абсолютной температуры T^{-1} , на которых по оси ординат нанесена логарифмическая шкала, действительно, представляют собой прямые линии, что находится в полном соответствии с уравнением (1). По углу наклона зависимостей $\eta(T^{-1})$ были рассчитаны значения энергии активация вязкого течения для каждого из испытанных масел (см. таблицу на с. 1247).

Продифференцировав зависимость (1) по температуре, получим

$$\frac{d\eta}{dT} = -\frac{U}{RT^2} \eta_0 \exp\left(\frac{U}{RT}\right). \quad (2)$$

Принимая во внимание, что $\frac{d\eta}{dT} = \frac{d\eta}{dt}$, и с учётом уравнения (1) выражение (2) можно переписать зависимость (2) в следующем виде:

$$\frac{d\eta}{dt} = -A\eta, \quad (3)$$

где $A = \frac{U}{RT^2}$.

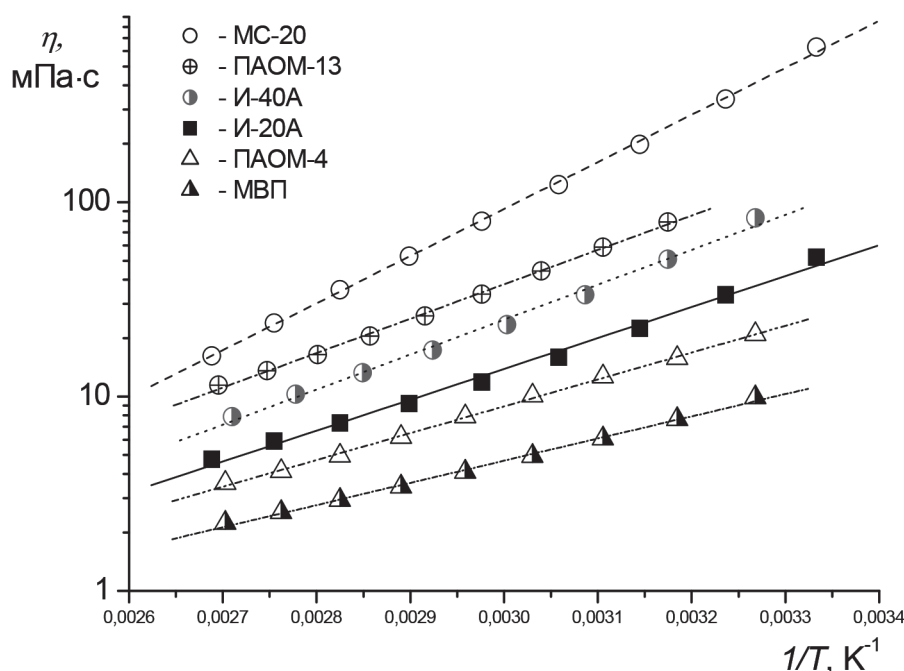


Рис. 5. Зависимость вязкости от обратного значения абсолютной температуры для различных масел

Очевидно, что коэффициент A перед переменной η в правой части уравнения (3) не является величиной постоянной, он зависит как от энергии активации, так и от температуры, однако зависимость на рис. 4 близка к линейной, а разброс экспериментальных точек несущественен. Это объясняется тем, что значение коэффициента A в уравнении (3) изменяется незначительно при изменении вязкости и температуры в широком диапазоне (см. таблицу). Тем не менее, эти незначительные изменения множителя A всё же приводят к отклонению графика рис. 4 от прямой линии, и он приобретает слабо выраженный нелинейный характер. Следовательно, именно термофлуктуационная природа зависимости вязкости от температуры является причиной существования единой зависимости $d\eta/dt$ от вязкости η (рис. 4).

Значения энергии активации и коэффициента A

Масло	U , кДж/моль	Значение A для разных масел при достижении вязкости		
		10 мПа·с	50 мПа·с	100 мПа·с
МВП	21,9	0,028	0,033	0,034
ПАОМ-4	26,4	0,030	0,037	0,039
И-20А	30,5	0,032	0,040	0,043
И-40А	34,4	0,032	0,042	0,045
ПАОМ-13	33,9	0,029	0,039	0,042
МС-20	46,4	0,035	0,047	0,052

По найденным значениям энергии активации вязкого течения каждого из испытанных масел была построена зависимость энергии активации от вязкости масел при температуре 20 °С, представленная на рис. 6. Зависимость $U(\eta)$ для минеральных масел можно аппроксимировать функцией вида $\eta = C_1 \cdot 10^{(U/C_2)}$, где C_1 и C_2 — опытные постоянные. Как видно, точки, соответствующие минеральным маслам, лежат на одной кривой, тогда как синтетические полиальфаолефиновые масла, похоже, формируют отдельную зависимость. Допуская одинаковый характер зависимости $U(\eta)$ для минеральных и синтетических масел, для полиальфаолефиновых масел через имеющиеся две точки можно также провести зависимость $U(\eta)$, идентичную зависимости для минеральных масел.

Так как между вязкостью и молекулярной массой масел одного гомологического ряда имеется однозначное соответствие, получается, что с увеличением молекулярной массы масла энергия активации увеличивается. Из рис. 6 также следует, что зависимость $U(\eta)$ асимптотически приближается к двум прямым: 1 и 2. Наличие этих асимптот важно для понимания механизма течения масел и природы зависимости вязкости от температуры.

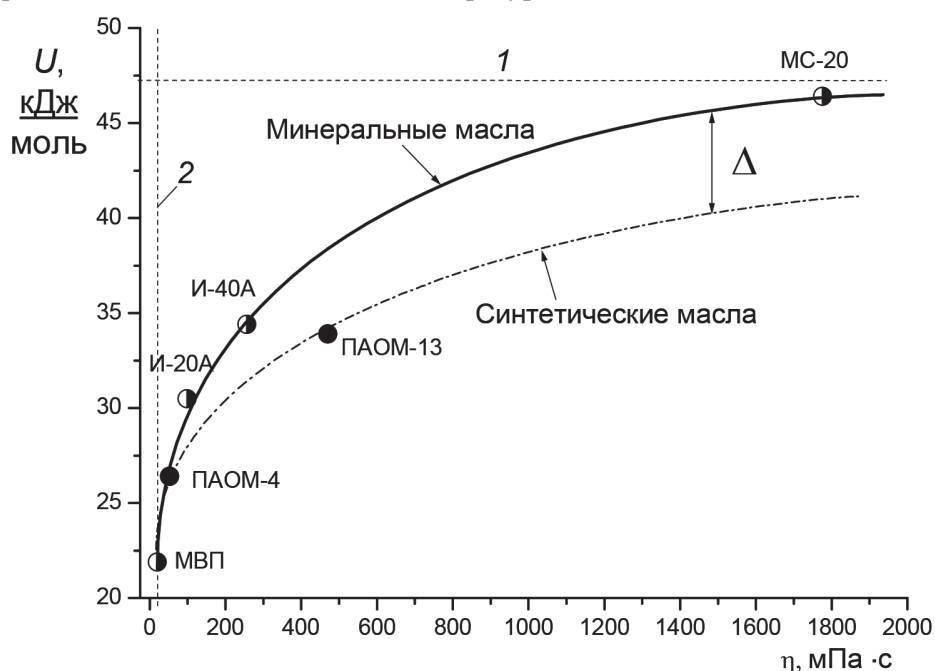


Рис. 6. Зависимость энергии активации вязкого течения от вязкости масел при температуре 20 °С

Известно, что механизм влияния температуры на вязкость зависит от вида органического соединения и структуры изомера. Так, в работе [13] на примере алкандиолов различного строения рассматривается зависимость энергии активации от длины углеродной цепи. Энергия активации для 1, 2-алкандиолов практически не зависит от количества атомов углерода в углеводородном радикале, так как водородные связи $O-H \cdots O$ между молекулами ведут к образованию мицеллярной структуры. В случае 1, n -алкандиолов с увеличением количества n атомов углерода в углеводородном радикале энергия активации вязкого течения увеличивается, при этом увеличение носит затухающий характер подобно графикам, предоставленным на рис. 6, и при $n \geq 6$ прирост энергии активации практически прекращается, что, по мнению авторов [13], вызвано тем, что молекулы 1, n -алкандиолов путём образования связей $O-H \cdots O$ формируют слоистые структуры. В случае неполярных молекул n -алканов, к которым относятся полиальфаолефиновые масла и преобладающая часть составляющих фракций минеральных масел, межмолекулярное взаимодействие обусловлено слабыми дисперсионными (силами Лондона) и электростатическими силами. При этом в работе [14] численным моделированием показано, что энергия активации диффузии, которую, в принципе, можно считать эквивалентом энергии активации вязкого течения, достигает асимптотического

предела при количестве атомов углерода в молекулярной цепи более шестидесяти, что соответствует графикам на рис. 6.

Ограничение роста энергии активации линией 1 на графиках рис. 6 можно объяснить, используя работы [15], [16]. В работе [15] на основе анализа данных, приведенных в литературе, указывается, что увеличение молекулярной массы низкомолекулярных соединений приводит только к ограниченному росту энергии активации их вязкого течения, предельные значения которой достигаются при молекулярных массах незначительных по сравнению с массами полимеров. Это объясняется тем, что температурная зависимость вязкости сравнительно высокомолекулярных соединений определяется размерами не молекул, а их небольших участков — сегментов, которые являются кинетически самостоятельными структурными элементами масла. Указанные сегменты включают не более 30 – 40 атомов основной цепи макромолекул [16], т. е. под действием тепла происходят «перескоки» именно сегментов из одного положения в другое. Исходя из ранее изложенного можно предположить, что вязкое течение высоковязких (т. е. со сравнительно большой молекулярной массой) минеральных и полиальфаолефиновых масел происходит путём прилипания и отрыва отдельных структурных фрагментов между соседними молекулами, и энергия активации течения таких масел определяется энергией разрушения временных узлов, образованных взаимодействием структурных фрагментов соседних молекул. Учитывая, что количество атомов углерода в молекулярной цепи самых вязких смазочных масел, как правило, не превышает 38 – 40, можно предположить, что для масел величина такого фрагмента значительно меньше, чем размер сегментов, указанный в источнике [16].

Существование вертикальной асимптоты 2 на рис. 6 указывает, по мнению авторов, на то, что для сравнительно низкомолекулярных масел, у которых размеры молекул меньше размера вышеупомянутых структурных фрагментов, энергия активации вязкого течения определяется количеством пар взаимодействующих метиленовых групп $-\text{CH}_2-$. Можно предположить, что в этом случае значения энергии активации обусловлены энергией, необходимой для сдвига молекул как единого целого относительно друг друга на определенное расстояние, подобно тому, как в случае ионной кристаллической решетки происходит миграция ионов по дефектам (вакансиям) кристаллической решетки. Соответственно энергия будет определяться суммарной энергией связей между молекулами при их относительном сдвиге, а также геометрическими факторами.

Известно, что при равном количестве атомов углерода в молекуле вязкость циклических углеводородов выше, чем линейных: энергия межмолекулярных связей, как показано для димеров, возрастает в ряду «линейные углеводороды — циклические — ароматические» слева направо [17]. Присутствие большего количества боковых ответвлений в молекулах минеральных масел по сравнению с полиальфаолефиновыми маслами, наоборот, вязкость снижает [18]. Однако разность (Δ) ординат точек (см. рис. 6), лежащих на двух зависимостях, при одинаковом значении вязкости обусловлена именно большим количеством боковых ответвлений в молекулах минеральных масел, так как углеводороды линейного строения показывают более низкую энергию активации по сравнению с разветвленными [19].

Заключение

Наиболее важным фактором, влияющим на изменение вязкости от температуры, является непосредственно сама вязкость. Для разных масел существует единая зависимость $d\eta/dt$ от вязкости η , которую можно аппроксимировать единой функцией, близкой к линейной, что следует из термофлуктуационной природы вязкого течения масел. Вместе с тем, по мнению авторов, для синтетических полиэфирных и силиконовых масел зависимость $d\eta/dt$ от вязкости η может быть иной. Это объясняется тем, что в данном диапазоне температур для синтетических жидкостей не происходит значительных структурных изменений, обуславливающих уменьшение сил межмолекулярного взаимодействия между полярными функциональными группами этих жидкостей.

Высоко- и низковязкие масла имеют разный механизм вязкого течения. Энергия активации вязкого течения сравнительно вязких масел определяется энергией разрушения временных узлов

между молекулами, образующихся прилипанием их небольших участков — структурных фрагментов, которые являются кинетически самостоятельными структурными элементами масла. Энергия активации вязкого течения сравнительно низкомолекулярных масел, т. е. низковязких, определяется силами Ван-дер-Ваальса и зависит от количества атомов углерода в молекулярной цепи.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Мышкин Н. К. Трение, смазка, износ. Физические основы и технические приложения трибологии / Н. К. Мышкин, М. И. Петроковец. — М.: Физматлит, 2007. — 368 с.
2. Камерон А. Теория смазки в инженерном деле / А. Камерон. — М.: Mashgiz, 1962. — 296 с.
3. Чичинадзе А. В. Основы трибологии (трение, износ, смазка) / А. В. Чичинадзе, Э. Д. Браун, Н. А. Буше [и др.]; под общ. ред. А. В. Чичинадзе. — М.: Машиностроение, 2001. — 664 с.
4. Queimada A. J. Viscosity and liquid density of asymmetric n-alkane mixtures: measurements and modeling / A. J. Queimada, I. M. Marrucho, J. A. P. Coutinho, E. H. Stenby // International Journal of Thermophysics. — 2005. — Vol. 26. — Is. 1. — Pp. 47–61. DOI: 10.1007/s10765-005-2352-4.
5. Kamila S. Hetero-molecular associations in different polar and non-polar binary mixtures/ S. Kamila, G. D. Natraj // Turkish Journal of Physics. — 2012. — Vol. 36. — Is. 3. — Pp. 422–429. DOI: 10.3906/fiz-1201-2.
6. Dikko A. B. Investigations on the Effect of Temperature Change on Activation Energy and Infinite Viscosity of Some Liquids / A. B. Dikko, A. D. Ahmed // International Journal of Science and Research. — 2014. — Vol. 3. — Is. 10. — Pp. 828–831.
7. Haj-Kacem R. B. Contribution to modeling the viscosity Arrhenius-type equation for some solvents by statistical correlations analysis / R. B. Haj-Kacem, N. Ouerfelli, J. V. Herráez, M. Guettari, H. Hamda, M. Dal-lel // Fluid Phase Equilibria. — 2014. — Vol. 383. — Pp. 11–20. DOI: 10.1016/j.fluid.2014.09.023.
8. Messaâdi A. A New Equation Relating the Viscosity Arrhenius Temperature and the Activation Energy for Some Newtonian Classical Solvents / A. Messaâdi, N. Dhoubi, H. Hamda, F. B. M. Belgacem, Y. H. Adbelkader, N. Ouerfelli, A. H. Hamzaoui // Journal of Chemistry. — 2015. — Vol. 2015. DOI: 10.1155/2015/163262.
9. Беллами Л. Инфракрасные спектры сложных молекул / Л. Беллами. — М.: ИЛ, 1963. — 590 с.
10. Larkin P. J. Infrared and Raman spectroscopy: principles and spectral interpretation / P. J. Larkin. — Elsevier, 2011. — 230 p.
11. Gooss W. New method of chemical composition on modern automotive lubricant base-oils / W. Gooss, A. Korn // 2nd World TRIBOLOGY Congress. — Vienna, Austria: The Austrian Tribology Society, 2001.
12. Шрамм Г. Основы практической реологии и реометрии / Г. Шрамм. — М.: КолосС, 2003. — 312 с.
13. Czechowski G. The Viscous Properties of Diols I. The Homologous Series of 1, 2- and 1, n-Alkanediols / G. Czechowski, J. Jadzyn // Zeitschrift für Naturforschung A. — 2003. — Vol. 58. — Is. 5 – 6. — Pp. 317–320. DOI: 10.1515/zna-2003-5-612.
14. Lee S. H. Viscosity and Diffusion Constants Calculation of n-Alkanes by Molecular Dynamics Simulations / S. H. Lee, T. Chang // Bulletin of Korean Chemical Society. — 2003. — Vol. 24. — Is. 11. — Pp. 1590–1598.
15. Тагер А. А. Физико-химия полимеров / А. А. Тагер. — М.: Научный мир, 2007. — 573 с.
16. Бартнев Г. М. Реологические свойства полиизобутилена / Г. М. Бартнев, Л. А. Вишницкая // Высокомолекулярные соединения. — 1964. — Т. VI. — № 4. — С. 751–757.
17. Premkumar J. R. Quantifying dispersion interaction: A study of alkane and alkene dimers / J. R. Premkumar, D. Umavedi, G. N. Sastry // Indian Journal of Chemistry. — 2014. — Vol. 53A. — Pp. 985–991.
18. Advances in Engineering Fluid Mechanics: Multiphase Reactor and Polymerization System Hydrodynamics / edited by N. P. Cheremisinoff. — Houston: Gulf Publishing Company, 1996. — 772 p.
19. Бартнев Г. М. Определение энергии активации вязкого течения полимеров по экспериментальным данным / Г. М. Бартнев // Высокомолекулярные соединения. — 1964. — Т. VI. — № 2. — С. 335–340.

REFERENCES

1. Myshkin, N. K., and M. I. Petrokovets. *Trenie, smazka, iznos. Fizicheskie osnovy i tekhnicheskie prilozheniya tribologii*. M.: Fizmatlit, 2007.
2. Kameron, A. *Teoriya smazki v inzhenernom dele*. M.: Mashgiz, 1962.
3. Chichinadze, A. V., E. D. Braun, N. A. Bushe, et al. *Osnovy tribologii (trenie, iznos, smazka)*. Edited by A. V. Chichinadze. M.: Mashinostroenie, 2001.

4. Queimada, António J., I. M. Marrucho, J. A. P. Coutinho, and E. H. Stenby. "Viscosity and liquid density of asymmetric n-alkane mixtures: measurement and modeling." *International journal of thermophysics* 26.1 (2005): 47–61. DOI: 10.1007/s10765-005-2352-4.
5. Kamila, Susmita, and Ganesh Durgachalam Natraj. "Hetero-molecular associations in different polar and non-polar binary mixtures." *Turkish Journal of Physics* 36.3 (2012): 422–429. DOI: 10.3906/fiz-1201-2.
6. Dikko, A. B., and A. D. Ahmed. "Investigations on the Effect of Temperature Change on Activation Energy and Infinite Viscosity of Some Liquids." *International Journal of Science and Research* 3.10 (2014): 828–831.
7. Haj-Kacem, R. Ben, N. Ouerfelli, J.V. Herráez, M. Guettari, H. Hamda, and M. Dallel. "Contribution to modeling the viscosity Arrhenius-type equation for some solvents by statistical correlations analysis." *Fluid Phase Equilibria* 383 (2014): 11–20. DOI: 10.1016/j.fluid.2014.09.023.
8. Messaâdi, Aymen, N. Dhoubi, H. Hamda, F. B. M. Belgacem, Y. H. Abdelkader, N. Ouerfelli, and A. H. Hamzaoui. "A new equation relating the viscosity Arrhenius temperature and the activation energy for some Newtonian classical solvents." *Journal of Chemistry* 2015 (2015). DOI: 10.1155/2015/163262.
9. Bellami, L. *Infrakrasnye spektry slozhnykh molekul*. M.: IL, 1963.
10. Larkin, P. J. *Infrared and Raman spectroscopy: principles and spectral interpretation*. Elsevier, 2011.
11. Gooss, W., and A. Korn. "New method of chemical composition on modern automotive lubricant base-oils." 2nd World TRIBOLOGY Congress. Vienna, Austria: The Austrian Tribology Society, 2001.
12. Shramm, G. *Osnovy prakticheskoi reologii i reometrii*. M.: KolosS, 2003.
13. Czechowski, Grzegorz, and Jan Jadżyn. "The Viscous Properties of Diols. I. The Homologous Series of 1, 2-and 1, n-Alkanediols." *Zeitschrift für Naturforschung A* 58.5-6 (2003): 317–320. DOI: 10.1515/zna-2003-5-612
14. Lee, Song Hi, and Taihyun Chang. "Viscosity and diffusion constants calculation of n-alkanes by molecular dynamics simulations." *Bulletin-Korean Chemical Society* 24.11 (2003): 1590–1598.
15. Tager, A. A. *Fiziko-khimiya polimerov*. M.: Nauchnyi mir, 2007.
16. Bartenev, G. M., and L. A. Vishnitskaya. "Reologicheskie svoistva poliizobutilena." *Vysokomolekulyarnye soedineniya* VI.4 (1964): 751–757.
17. Premkumar, J. Richard, Deivasigamani Umadevi, and G. Narahari Sastry. "Quantifying dispersion interaction: a study of alkane and alkene dimers." *Indian Journal of Chemistry* 53A (2014): 985–991.
18. Cheremisinoff, Nicholas P., ed. *Advances in Engineering Fluid Mechanics: Multiphase Reactor and Polymerization System Hydrodynamics*. Houston: Gulf Publishing Company, 1996.
19. Bartenev, G. M. "Opredelenie energii aktivatsii vyazkogo techeniya polimerov po eksperimental'nym dannym." *Vysokomolekulyarnye soedineniya* VI.2 (1964): 335–340.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Цветков Юрий Николаевич —
доктор технических наук, профессор
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала
С. О. Макарова»
198035, Российская Федерация, Санкт-Петербург,
ул. Двинская, 5/7
e-mail: yuritsvet@mail.ru, ZvetkovUN@gumrf.ru
Власов Михаил Юрьевич —
кандидат химических наук
ООО «Люмэкс-маркетинг»
199178, Российская Федерация, Санкт-Петербург,
пр. Малый В.О., 58а
e-mail: VlasovMY@lumex.ru
Дехтярь Леонид Иванович — аспирант
Научный руководитель:
Цветков Юрий Николаевич
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала
С. О. Макарова»
198035, Российская Федерация, Санкт-Петербург,
ул. Двинская, 5/7
e-mail: dekhtyar.l@bk.ru, kaf_tsr@gumrf.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Tsvetkov, Yuriy N. —
Doctor of Technical Sciences, professor
Admiral Makarov State University of Maritime
and Inland Shipping
5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg, 198035,
Russian Federation
e-mail: yuritsvet@mail.ru, ZvetkovUN@gumrf.ru
Vlasov, Michail Yu. —
PhD
Lumex-marketing Ltd
58a Malyy V.O. Avenue, St. Petersburg, 199178,
Russian Federation
e-mail: VlasovMY@lumex.ru
Dekhtyr, Leonid I. — Postgraduate
Supervisor:
Tsvetkov, Yuriy N.
Admiral Makarov State University of Maritime
and Inland Shipping
5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg, 198035,
Russian Federation
e-mail: dekhtyar.l@bk.ru, kaf_tsr@gumrf.ru

Статья поступила в редакцию 4 сентября 2017 г.
Received: September 4, 2017.

MODELING OF THE PROCESS OF WINDING SHELLS OF COMPOSITE MATERIALS

E. N. Beletskii

Concern Aurora Scientific and Production Association JSC,
St. Petersburg, Russian Federation

The issues associated with the technology of winding a tape of composite materials. The peculiarities of technological processes of shaping blanks of solids of revolution method of winding. The definition of tape drive mechanism used for winding shells and the basic classification signs. Presents a generalized kinematic diagram of the mechanism for moving and winding the yarns and tapes. Considered dynamic phenomena occurring during the process of winding and storing yarn. Selected methods of process control of the winding tape. Noted for active and passive devices in the mechanisms of regulation of speed and yarn tension. Devices are classified according to the degree of automation of the process of moving and coiling of the tape. Mathematical dependences describing the dynamic characteristics of the process teach-equipped with the necessary fullness of friction interaction and elastic components of the mechanism as a whole. On the example of calculation of the correction device, consisting of elastic and plastic elements, shows how to provide dynamic resistance in a tape drive for the lowland, to avoid resonance phenomena of the winding process of the ribbon and as a consequence of the defects in the blanks. Using mathematical equations and initial conditions the calculation of amplitude-frequency characteristics. The results of numerical simulation are presented in the form of graphs containing extreme points, corresponding to the resonance phenomena in the mechanism. The results of Chis-industrial simulations confirm the accuracy and correctness of the used mathematical relationships. The proposed mathematical dependence on the results of the calculations can be used in the construction of algorithms of computer-aided process control of winding the flax-Ter. In the framework of the presented algorithm a block diagram of the system adaptation.-of the MOU and management of the coiling process, which includes elements of automatic speed measuring of re-placement and deflection of the thread.

Keywords: composite material, shell, winding technology, dynamic performance, algorithm, dynamic model, example of calculation, the resonance phenomena.

For citation:

Beletskii, Evgenii N. "Modeling of the process of winding shells of composite materials." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admiral S. O. Mararova* 9.6 (2017): 1252–1261. DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-6-1252-1261.

УДК 676.026.77

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА НАВИВКИ ОБОЛОЧЕК КОМПОЗИЦИОННЫМИ МАТЕРИАЛАМИ

Е. Н. Белецкий

АО «Концерн «НПО» Аврора», Санкт-Петербург, Российская Федерация

Рассмотрены вопросы, связанные с технологией намотки ленточных полимерных композиционных материалов. Отмечены особенности технологического процессы формообразования заготовок тел вращения способом навивки. Дано определение лентопротяжного механизма, используемого для намотки оболочек и выделены основные классификационные признаки. Представлена обобщенная кинематическая схема механизма транспортировки и навивки нитей и ленты. Рассмотрены динамические явления происходящих при процессе намотки и укладывания нитей. Выделены способы управления процессом намотки лентой. Отмечены активные и пассивные устройства в механизмах регулирования скорости и натяжения нити. Устройства классифицированы по степени автоматизации процесса транспортировки и навивки ленты. Представлены математические зависимости, описывающие динамические характеристики процесса, учитывающие с необходимой полнотой фрикционные взаимодействия и упругие составляющие механизма в целом. На примере расчета корректирующего устройства, состоящего из упругого и пластического элементов, показано, каким образом можно обеспечить динамическую устойчивость в лентопротяжном механизме, при этом исключив

резонансные явления процесса наматывания ленты и, как следствие, появление брака в заготовках. С использованием математических зависимостей и исходных условий выполнен расчет амплитудно-частотной характеристики. Результаты численного моделирования представлены в виде графиков, содержащих экстремальные точки, отвечающие явлениям резонанса в механизме. Результаты численного моделирования подтверждают правильность и корректность используемых математических зависимостей. Предложенные математические зависимости по итогам результатов расчетов могут быть использованы при построении алгоритмов систем автоматизированного управления процессом навивки лентами. В рамках представленного алгоритма разработана структурная схема системы адаптации режимов и управления процессом навивки, включающая элементы автоматического измерения скорости перемещения и прогиба нити.

Ключевые слова: композиционный материал, оболочки, технология навивки, динамические характеристики, алгоритм, динамические модели, пример расчета, резонансные явления.

Для цитирования:

Белецкий Е. Н. Моделирование процесса навивки оболочек композиционными материалами / Е. Н. Белецкий // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2017. — Т. 9. — № 6. — С. 1252–1261. DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-6-1252-1261.

Введение (Introduction)

В связи с ускоренным внедрением новых прогрессивных технологий в различных отраслях современной техники получают широкое распространение процессы наматывания лент, нитей и нитеподобных материалов. Намоткой из композиционных полимерных материалов изготавливаются камеры твердотопливных двигателей летательных аппаратов, корпуса сосудов высокого давления для атомных энергетических установок, химических реакторов, трубы, элементы судовых надстроек, оболочки корпусов подводных аппаратов [1] – [4]. Полученные намоткой конструкции применяются в электрических машинах и аппаратах, обеспечивая совмещение несущих и изолирующих функций [5].

Большой интерес к композиционным материалам, в первую очередь, связан с низкими затратами энергии (кВт·ч) на производство конструкций из этих материалов (в частности, в пересчете на 1 кг готовых изделий из углепластика с эпоксидной матрицей расходуется энергии примерно в 3 раза меньше, чем на изделия из стали, в 5,5 раз меньше, чем на изделия из алюминия и его сплавов, и в 20 раз меньше, чем на изделия из титановых сплавов).

Среди технологических машин и установок, используемых в судостроительной отрасли, содержащих механизмы с гибкими связями, можно выделить отдельную группу машин, где гибкие звенья образуются производимыми, перерабатываемыми или транспортируемыми материалами в виде лент и нитей при намотке оболочек (рис. 1). К данному классу относятся также технологические линии по обработке изделий из полимеров: экструзионные машины, линии для нанесения протекторных покрытий поверх электротехнической токопроводящей жилы кабеля и тому подобные функциональные устройства и машины [1], [4] – [6].

Механизмы с гибкими связями, используемые в технологии намотки [2], [7], до недавнего времени имели ограниченное применение в судостроительной отрасли, поскольку технологический процесс намотки ленты имел сложный алгоритм управления точностью и качеством получаемых заготовок. Полуавтоматические способы управления процессом, различные системы и корректирующие устройства пассивного и активного управления процессом не всегда давали желаемый результат в случае внезапного изменения скорости или силы натяжения ленты из композиционного материала. Специфические динамические процессы в таких механизмах исследованы крайне недостаточно.

Вопросы динамики процесса намотки, являющиеся важнейшими для управляющих алгоритмов, обычно рассматриваются на основе упрощенных моделей и не отражают существенных кинематических характеристик механизмов и геометрических параметров материалов (ширины ленты, коэффициенты сцепления и сила трения, линейные и угловые скорости, меняющийся радиус барабанов в процессе разматывания ленты и геометрии формируемой заготовки будущего изделия и т. д.), а также физико-механические характеристики самих полимерных композиционных материалов.

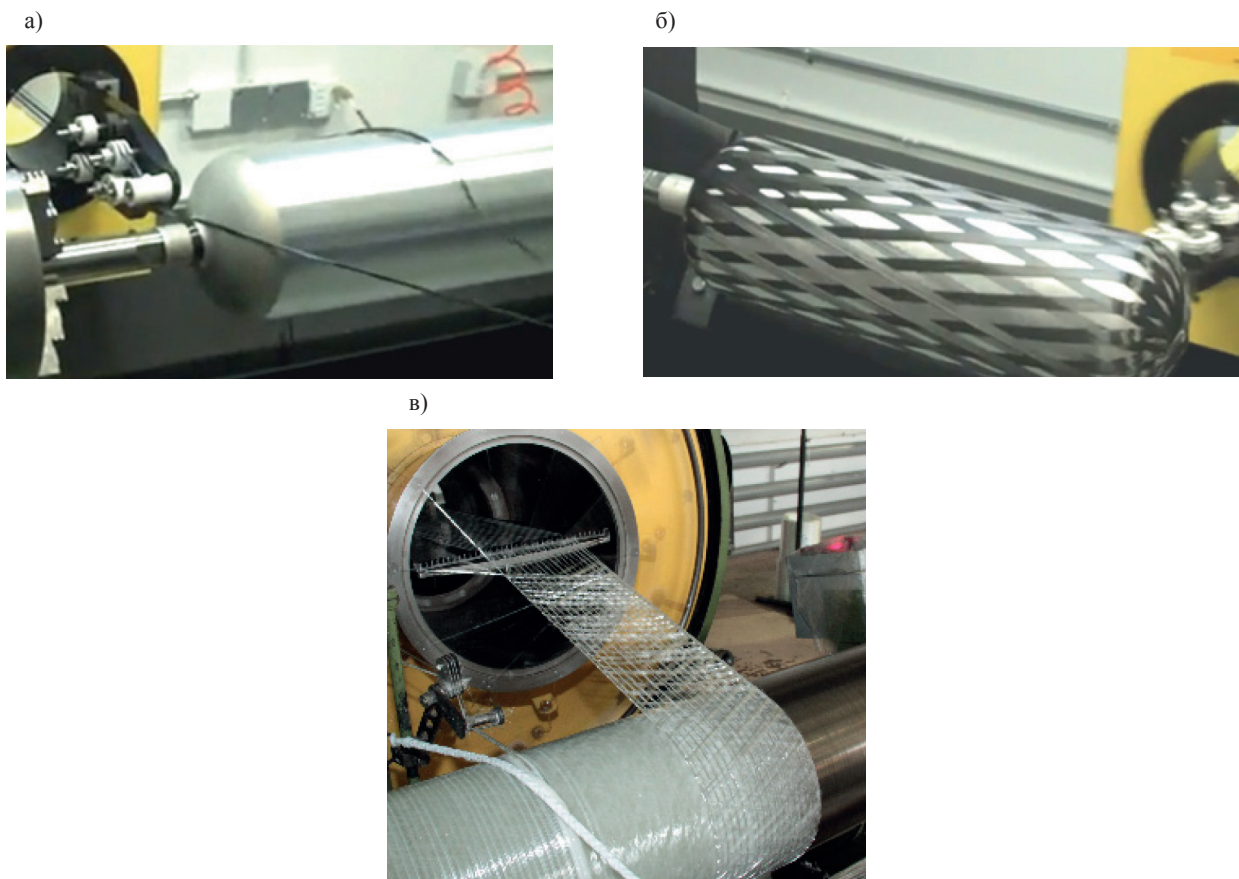


Рис. 1. Различные виды технологических процессов намотки заготовок: а; б — этапы намотки баллонов высокого давления с каркасом (оболочкой) в виде тонкостенного сосуда из нержавеющей стали, находящегося под давлением 2 – 3 атм.; в — намотка широкой композиционной лентой толстостенных труб высокого давления на цилиндрические заготовки (отношение ширины к толщине ленты более 1000)

Однако при формообразовании заготовок необходимо закладывать правильные математические зависимости в алгоритмы процесса для обеспечения заданного качества при наибольшей производительности. Поэтому моделирование процесса навивки и разработка работоспособных алгоритмов, контролирующих натяжение и скорость нити (ленты) из композитов, обеспечивающих точность и эффективность технологического передела на этапах получения заготовки, является актуальным для судостроительной отрасли.

Методы и материалы (Methods and Materials)

На современном этапе развития производства имеются новые возможности автоматизации процесса и использования пакета управляющих программ при адаптивной корректировке режимов технологического процесса. Развитые системы автоматизированного управления натяжения в технологических машинах с лентопротяжным механизмом обычно включают следующие звенья:

- разматываемый рулон в механизме раската, на валу которого располагается управляемый тормоз (обычно порошковый или электромагнитный);
- датчик натяжения ленты (в простейшем виде — механотронный);
- регулятор и корректирующие устройства.

Различные варианты схем измерения натяжения наматываемого материала (сила, абсолютное и относительное удлинение, напряжение) рассмотрены в работах [2], [7]. Как показано в работе [7], структурная схема измерителей натяжения может быть представлена в виде последовательно-го соединения следующих звеньев (рис. 2) упругого элемента *П1*; механического преобразователя *П2*, формирующего функциональную зависимость между усилием *P* и деформацией ζ ; индуктив-

ного преобразователя $\Pi 3$, трансформирующего механическое перемещение ζ в изменение электрического напряжения U ; преобразователя $\Pi 4$, регистрирующего измеряемое натяжение F .

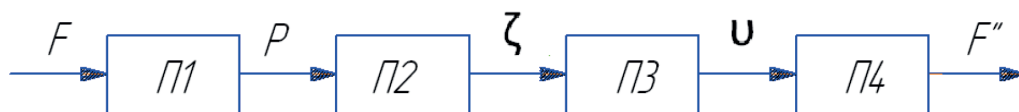


Рис. 2. Структурная схема измерителей натяжения:

F — функция, характеризующая исходное измеряемое натяжение в транспортируемой нити на входе в измеритель;

F'' — функция со скорректированными параметрами, необходимыми для системы управления кинематическим процессом транспортировки ленты

Основным объектом в данном исследовании является класс лентопротяжных механизмов, имеющий следующие основные характерные признаки: плоский разомкнутый тракт, фрикционный контакт тонкой натянутой ленты с валами (*приводными* — ведущими и *неприводными* — направляющими), непрерывное движение ленты в рабочем режиме, разматываемый рулон на входе тракта (раскат), накопитель на выходе тракта в качестве формируемой заготовки (накат).

При всем многообразии технологических процессов производства, переработки и транспортировки ленточных материалов применяемое для этих целей оборудование имеет лентопротяжный механизм, который состоит из узлов, связанных между собой гибким элементом — движущейся лентой (нитью). Такого рода механизмы также называют *механизмами с гибкими технологическими связями* или *механизмами с гибкими транспортируемыми связями* [7]. В статье принят термин «лентопротяжный механизм» для двумерного описания системы. Подобный класс механизмов имеет свои классификационные признаки: плоский разомкнутый тракт, фрикционный контакт тонкой натянутой ленты с валами (*приводными* — ведущими и *направляющими* — не приводными), непрерывное движение ленты в рабочем режиме, разматываемый рулон композиционного материала на входе тракта (раскат материала), накопитель на выходе тракта в виде заготовки изделия (накат материала). Схема рабочего тракта лентопротяжного механизма, характеризующегося различными видами кинематического взаимодействия и фрикционных контактов ленты (нити) с валами [7] — [10], представлена на рис. 3.

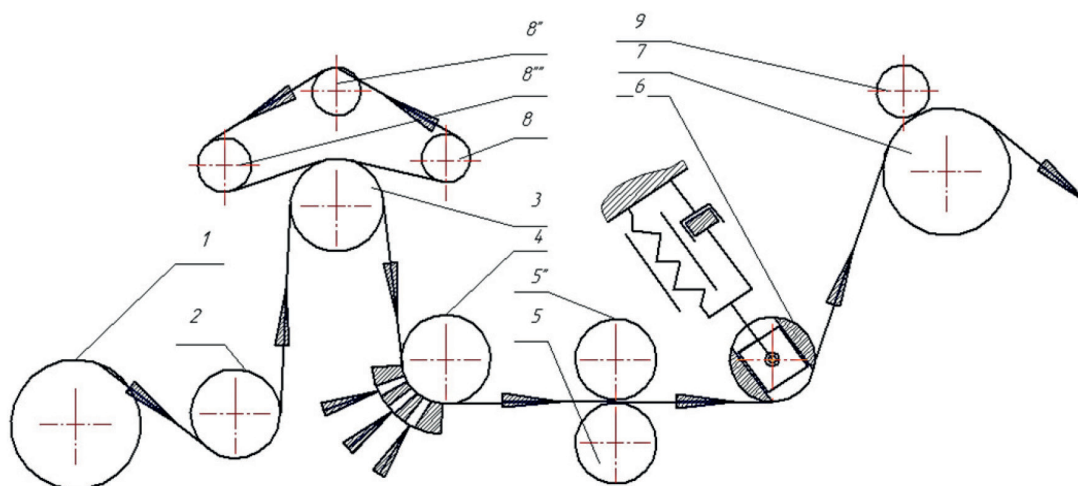


Рис. 3. Упрощенная кинематическая схема и виды фрикционных контактов в лентопротяжных механизмах: 1 — разматываемый рулон ленточного композиционного материала; 2 — вал в простом охвате, когда давление в контакте создается только натяжением ленты; 5 — узел захвата ленты между двумя валами ($5'$ и $5''$); 3 и 4 — валики в зоне контакта с которыми лента дополнительно прижимается к валу вспомогательной лентой (3) или пневматическим прижимным устройством (4), например, при охвате перфорированного вала с вакуумной камерой или вала с кольцевыми канавками; 6 — стабилизатор натяжения нити (по типу плавающего вала); 7 — вал, в зоне контакта с лентой, на выходе к объекту намотки; 9 — прижимной вал; $8'$, $8''$, $8'''$ — валики вспомогательного контура

В рамках разработанных алгоритмов целесообразно рассмотреть решение задач, связанных с динамическими процессами, происходящими в лентопротяжных механизмах технологических машин, а также поставить и провести корректные численные эксперименты и рационально использовать методы параметрической оптимизации с учетом имеющихся в конструкциях как пассивных, так и активных стабилизаторов, контролирующих натяжения и скорости ленты.

В связи с ограниченностью объема и многоплановостью поставленных задач в рамках данной статьи далее в качестве примеров рассматриваются вопрос динамического анализа на устойчивость и резонансные явления в конструкции пассивного стабилизатора контролирующего натяжения и скорости ленты. Далее по тексту не излагаются подробно выводы отдельных зависимостей и не комментируются математические операции, связанные с построением как точных, так и приближенных решений дифференциальных уравнений.

В качестве примера рассмотрим стабилизатор экспериментального стенда, являющегося моделью продольно-намоточного станка, кинематическая схема которого показана на рис. 4 [8]. Привод несущих валов периферического наката стенда оснащен системой автоматизированного управления натяжения наматываемой ленты композиционного материала. Для измерения натяжения в контакте с валом 2 в модели использован датчик механотронного типа. Стенд оснащен однокаскадным стабилизатором с плавающим валом (вал 4), опоры которого смонтированы по концам вала на независимых амортизаторах. Такая конструкция стабилизатора, как показали результаты экспериментов, обеспечила резкое сокращение бортового «рыскания» ленты. Вследствие этого осуществлялось выравнивание торцевой поверхности наматываемого рулона. В рассматриваемой схеме на оси разматываемого рулона смоделирован порошковый тормоз для создания тормозного момента.

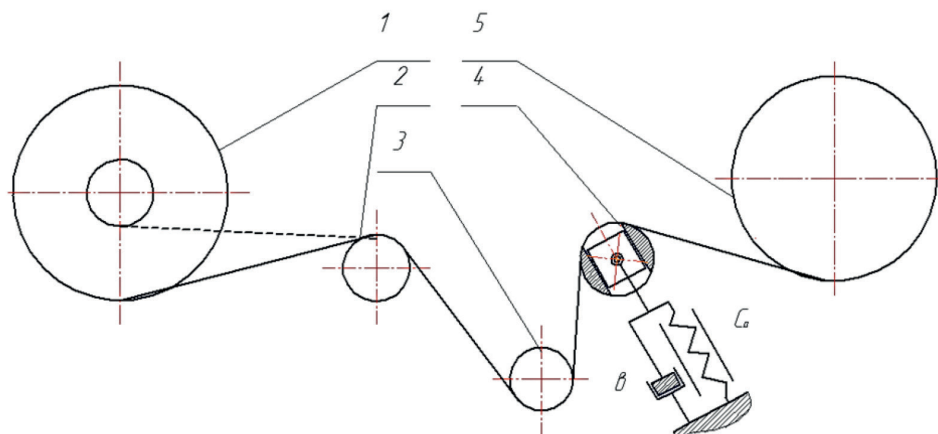


Рис. 4. Схема экспериментального стенда продольно-намоточного станка со стабилизатором натяжения ленты типа плавающего вала, оснащенного порошковым тормозом

На рис. 4 рассмотрена одна из наиболее распространенных конструктивных схем стабилизаторов с плавающим валом, в которой ось вала по одной из полярных координат $(\vec{r}, \theta)$ фиксирована, а по другой — соединена с неподвижной стойкой простым упруго-диссипативным звеном. Данная конструкция называется *простым (однокаскадным) амортизатором* и отображает диссипативные свойства линеаризованной модели.

Численный эксперимент проводился с рулонами композитной ленты из стеклопластика, имеющей параметры: ширина ленты $b' = (225 \pm 20)$ мм; поверхностная плотность $\rho = (30/35 \pm 5)$ г/м; количество нитей на 100 мм $n' = 400/485 \pm 25$; плотность нити $\rho' = (1,69 \pm 0,05)$ г/см³. Толщина монослоя углепластика $h' = (0,10 - 0,15)$ мм. Разрушающие напряжения при растяжении в углепластике $\sigma' = 0,7$ ГПа; разрушающие напряжения при сжатии в углепластике $\sigma'' = 0,7$ ГПа; модуль упругости углепластика при изгибе $E' = (157 \pm 25)$ ГПа; плотность углепластика $\rho'' = (1,49 \pm 0,05)$ г/см³.

Среднее натяжение ленты в тракте лентопротяжного механизма варьировалось в пределах $F_{cp} = 500 \dots 1400$ Н. В проведенных экспериментах лента перематывалась со скоростью $V_0 = 4$ м/с.

Максимальная скорость ленты составляла $V_{\max} = 20$ м/с, при этом параметры динамического процесса определялись значениями коэффициентов: $\eta \approx 10$; $\zeta_a \approx 0,10$ и коэффициентами отношения стационарных скоростей на плавающем вале $k_j = 1,01$, а также коэффициентом $k_{\max} = 0,29$.

Ранее указанные условия гарантируют устойчивость лентопротяжного механизма при $n = 4$. На основной скорости $V_0 = 4$ м/с величина η увеличивается, а значение ζ_a при настройке на определенный радиус рулона — уменьшается в 25 раз. При том же значении k_j величина $k_{\max}$ оказывается теперь $k_{\max} = 1,9$, и достаточное условие устойчивости не выполняется. Уменьшение значения k_j до реально достижимого ($k_j = 1,001$) снижает величину $k_{\max}$ до $k_{\max} = 0,35$, что вполне приемлемо по условию устойчивости лентопротяжного механизма.

Приведенные данные, полученные в работах [7], [8], характеризуют работоспособность достаточного признака устойчивости лентопротяжного механизма со стабилизатором типа однокаскдного амортизатора, т. е. рекуррентного условия с подстановкой в формулу (1):

$$\min a_m = a_m^0 = 1 - k_m / (4a_{m+1}^0) > 0;$$

$$m = n - 1; n - 2 \dots, 1; a_n^0 = 1, \quad (1)$$

при численном определении коэффициента $k_{\max}$. Анализ полученных результатов показал, что область возможной неустойчивости лентопротяжного механизма обнаруживается расчетом только при учете: крутильной инерции плавающего вала ($\tau_j \neq 0$), трения на его оси ($\mu_j \neq 0$) и зоны сцепления в контакте плавающего вала с лентой ($T_{nj} \neq 0$). Установлено [7], что указанная область сокращается с уменьшением τ_j и μ_j . Что касается запаздывания, то его влияние значительно сложнее.

Располагая передаточными функциями и условиями устойчивости, можно построить амплитудно-частотную характеристику (АЧХ) звена, включающего стабилизатор с плавающим валом. По данным экспериментов, приведенным в работах [7], [8], [10], установлено, что форма и характеристика АЧХ зависят от всех параметров промежуточных валов и свободных участков тракта лентопротяжного механизма. Из выражения

$$W_{\varepsilon_n/\mu_0} = \frac{k_0}{\Delta(p)} \left\{ k_j Q_a [1 + \tau_j p \exp(-T_{nj} p)] - \tilde{m}_b \alpha_1 \alpha_2 p^2 \right\} \times \prod_{m=1; m \neq j}^{n-1} k_m [1 + \tau_m p \exp(-T_{nm} p)] \quad (2)$$

для $W_{\varepsilon_n/\varepsilon_{\text{вх}}}(p)$ следует, что имеется частота антирезонанса, на которой происходит полное подавление гармонического возмущения. Частота антирезонанса при этом определяется только параметрами стабилизатора: условием равенства нулю при $p = i\omega$ выражения в фигурных скобках (2) или числителя следующего выражения:

$$W_{\varepsilon_2/\varepsilon_{\text{вх}}}(p) = \frac{1}{\Delta(p)} \left\{ Q_a [1 + \tau p \exp(-pT_n)] - \tilde{m}_b \alpha_1 \alpha_2 p^2 \right\}, \quad (3)$$

где $\Delta(p)$ — характеристический определитель системы, причем

$$\Delta(p) = Q_a [P_1 P_2 \tau p + P_1 + P_2 - \exp(-pT_n)] + (ES\alpha_\Sigma^2/V_0) p + \tilde{m}_b p^2 [P_1 \alpha_1^2 + P_2 \alpha_2^2 + \alpha_1 \alpha_2 \exp(-T_n p)].$$

Считая условие устойчивости лентопротяжного механизма обеспеченным, будем полагать значение коэффициента $k_j \approx 1 \forall j$.

При заданной частоте возмущения это условие дает требуемые значения коэффициентов жесткости (c) и демпфирования (b) для настройки плавающего вала в антирезонанс согласно системе:

$$\left. \begin{aligned} c &= m\omega^2 \left[1 - \frac{\lambda}{g} (1 + \omega\tau \sin \omega T_n) \right]; \\ b &= \frac{\lambda}{g} \tau m\omega^2 \cos \omega T_n, \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

где $\lambda = \alpha_1 \alpha_2 \tilde{m}_b / m < 1$; $g = 1 + \omega^2 \tau^2 + 2\omega\tau \sin \omega T_n$.

Настройка по решению системы (4), естественно, реализуема, если полученные значения c и b положительны ($c > 0$; $b > 0$). Отсюда следует, что стабилизатор без демпфера способен компенсировать гармонические возмущения только с определенными частотами ω , подчиняющимися выражению

$$\omega = (2n - 1)\pi / (2T_n); \quad n = 1, 2, \dots \quad (5)$$

при достаточно высоком по величине коэффициенте жесткости

$$c = m\omega^2 [1 - \lambda / (1 \pm \omega\tau)]. \quad (6)$$

В выражении (6) значение ω выбирается из ряда (5). В модели с безынерционным плавающим валом (при $\tau = 0$), напротив, только стабилизатор без демпфера ($b = 0$) дает полное гашение колебаний на собственной частоте амортизатора: $\omega_a = (c/m)^{1/2}$.

Далее рассмотрим резонансные свойства стабилизатора с плавающим валом на примере звена без промежуточных валов. АЧХ для такого звена по основному каналу возмущения определяется на основе передаточной функции (3). Собственные частоты рассматриваемого звена в отсутствие демпфирования, вносимого транспортированием ленты, определяются из характеристического уравнения $\Delta(p) = 0$ при $V \rightarrow 0$, при условии, что $p = i\omega$. Тогда, выполнив преобразование указанным образом выражение $\Delta(p)$ в функции (3), получим

$$p^4 + \{\omega_k^2 + \omega_a^2 + [ES/(ml_1l_2)](l_1^2\alpha_2^2 + l_2^2\alpha_1^2)\}p^2 + \omega_k^2\omega_c^2 = 0, \quad (8)$$

где $\omega_k^2 = ES(l_1 + l_2)/(l_1l_2\tilde{m}_b)$; $\omega_c^2 = \omega_a^2 + ES(\alpha_1 + \alpha_1)^2/[m(l_1 + l_2)]$; ω_k — парциальная собственная частота крутильных колебаний подвижного вала; ω_c — парциальная собственная частота колебаний массы стабилизатора, соединенного с осью плавающего вала (единственная собственная частота звена в модели с безынерционным плавающим валом, т. е. при $\omega_k \rightarrow \infty$).

Если $\alpha_1/l_1 = \alpha_2/l_2$ и податливости ленты в направлении перемещения оси плавающего вала одинаковы, то, как следует из уравнения (8), собственными частотами звена с плавающим валом являются парциальные частоты ω_k и ω_c , т. е. смешанные в общем случае формы колебаний разделяются. АЧХ в упрощенной модели звена, в которой не рассматривается влияние крутильной инерции плавающего вала ($\tau = 0$), на основании функции (3) имеет вид

$$A(\omega) = \left\{ (z_a^2 + \beta_0^2\omega^2) / [z_a^2 + T_\Sigma^2\omega^2z_c^2 + \beta_0^2\omega^2(1 + T_\Sigma^2\omega^2z_c^2) + 2\beta_0T_\Sigma\omega^2(\omega_c^2 - \omega_a^2)] \right\}^{1/2}, \quad (9)$$

где $z_a = \omega_a^2 - \omega^2$; $z_c = \omega_c^2 - \omega^2$; $\beta_0 = b/m$; $T_\Sigma = T_1 + T_2$.

В звене без демпфера ($\beta_0 = 0$) имеем:

$$A(\omega) = 0 \text{ при } \omega = \omega_a; \quad \max A(\omega) = 1 \text{ при } \omega = \omega_c.$$

Результаты (Results)

График АЧХ для изложенных выше условий представлен на рис. 5, а. Из анализа выражения (8) следует, что малое демпфирование (малое значение β_0) приводит к уменьшению амплитуды и к увеличению частоты резонанса. В антирезонансе частота понижается, а амплитуда возрастает. При значительном демпфировании характеристика становится монотонной.

Для полной модели звена лентопротяжного механизма с плавающим валом выражение АЧХ получается достаточно громоздким. Некоторое упрощение происходит, если рассматривать симметричное звено, для которого $\alpha_1 = \alpha_2 = \alpha$ и $T_1 = T_2 = T$. Тогда в случае механизма с плавающим валом без демпфера ($b = 0$) из выражения $\Delta(p)$ согласно функции (3) АЧХ, можно получить

$$A(\omega) = \left\{ (h_1^2 + h_2^2 + 2h_1h_2 \sin \omega T_n) / [h_1^2 + h_3^2 + h_4^2 - 2h_1(h_3 \cos \omega T_n - h_4 \sin \omega T_n)] \right\}^{1/2}, \quad (9)$$

где $h_1 = z_a z_k + z_c \omega^2$; $h_2 = 2\omega z_a / T$; $h_3 = 2\omega T (z_a z_k - z_c \omega^2)$; $h_4 = 2\omega T (z_c z_k + z_a / T^2)$.

Анализ выражения (9) показывает, что $A(\omega \leq 1)$, причем $A = 1$ только на собственных частотах при определенной величине запаздывания: на частоте $\omega = \omega_k$. На рис. 5, а приведены графики АЧХ при фиксированных значениях ω_a , ω_c и различных ω_k .

Кривые 1 и 2 соответствуют случаю, когда запаздывание не учитывается, т. е. принимается $T_n = 0$. Кривая 3 отражает влияние запаздывания, причем $T_n = 0,7T$. Представленные кривые (см. рис. 5, б) получены при следующих условиях: $z_a = 1$, $z_c = 3$. Полученные графики и анализ АЧХ в целом показывают, что основной резонансной частотой является частота ω_c и близость ее к ω_k уменьшает эффект стабилизации.

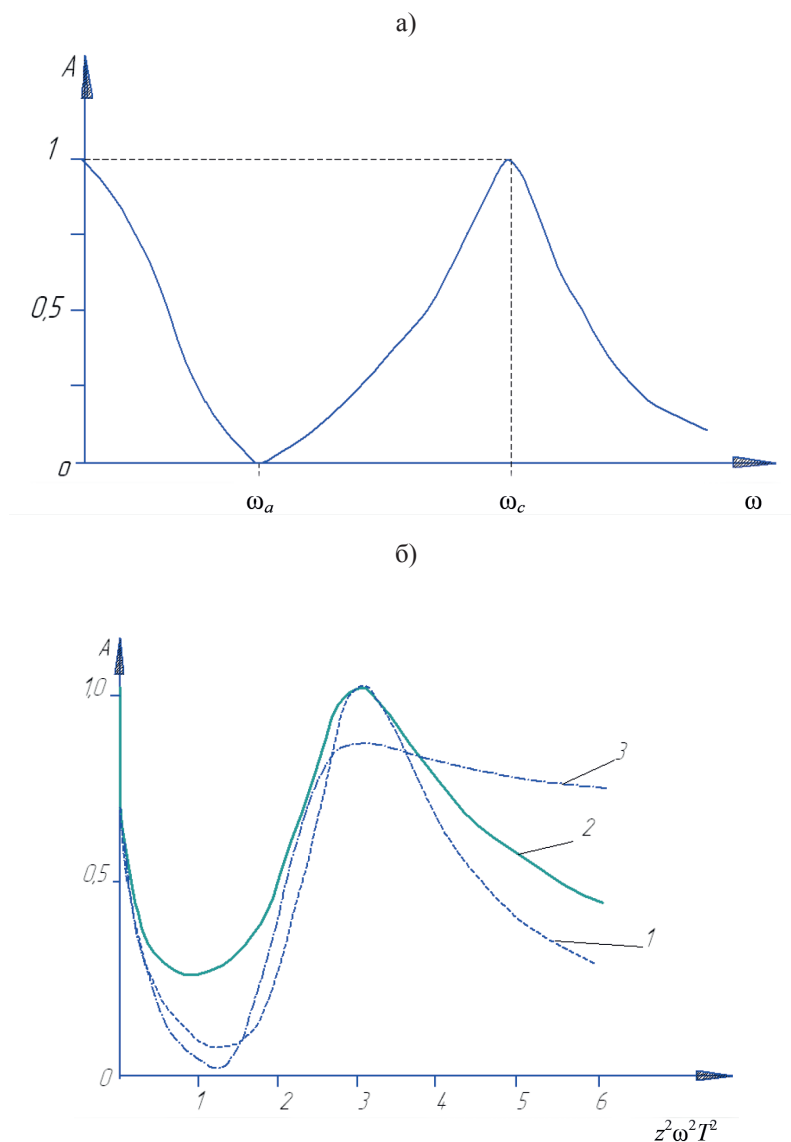


Рис. 5. Результаты численного моделирования АЧХ натяжения лентопротяжного механизма с простым стабилизирующим звеном: а — упрощенная; б — полная для симметричного звена
Условные обозначения: 1, 2 — без учета запаздывания; 3 — с учетом запаздывания

Выводы

1. В исследовании представлен вариант расчета по предложенной динамической модели стабилизатора натяжения и скорости для лентопротяжного механизма применительно к различным видам оценки их эффективности, найдены условия устойчивости, рассмотрены специфические динамические особенности их применением в тракте лентопротяжных механизмов.

2. Представленное обобщенное математическое описание взаимодействия транспортируемой ленты с плавающим валом послужило основой для разработки группы моделей различных пассивных стабилизаторов с плавающим валом, а также для анализа воздействия на динамику лентопротяжного механизма вибрации опор вращающихся узлов в тракте.

3. На базе предложенной модели, описанной линейными зависимостями для двух типов стабилизаторов, применяемых в лентопротяжных механизмах, предложен алгоритм построения амплитудных характеристик с возможностью полного подавления гармонических воздействий фиксированных частот.

4. Рассмотрены простые схемы однокаскадной амортизации, способной подавлять бигармонические возмущения и стабилизировать натяжение ленты в полосе частот.

5. Предложена схема амортизации рулона и обоснована эффективность ее применения. Результаты подтверждены численными экспериментами.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Анисимов А. В.* Современные машиностроительные материалы. Неметаллические материалы: справ. / А. В. Анисимов, В. Е. Бахарева, И. В. Блышко [и др.]; под общ. ред. И. В. Горынина и А. С. Орыщенко. — СПб.: НПО «Профессионал», 2012. — 916 с.

2. *Петров В. М.* Определение постоянных упругости с учетом анизотропии свойств композиционных материалов, используемых для намотки ответственных оболочек и стержневых конструкций в судостроении и портовой инфраструктуре / В. М. Петров, В. Н. Глухих, Н. Ю. Сойту // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2016. — № 2 (36). — С. 137–142. DOI: 10.21821/2309-5180-2016-8-2-137-142.

3. *Белецкий Е. Н.* Различные уровни моделирования сложных конструкций судовых энергетических установок, отдельные элементы которых выполнены из композиционных полимерных материалов / Е. Н. Белецкий // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2016. — № 1 (35). — С. 138–144. DOI: 10.21821/2309-5180-2016-8-1-138-144.

4. Пат. 2458791 Российская Федерация, МПК В29С 44/12, В29С 51/12, В29С 63/14. Способ и оснастка для изготовления осесимметричных пустотелых оболочек (оболочек вращения) из полимерных композиционных материалов / В. Б. Литвинов, М. С. Токсанбаев, А. В. Артемьев, А. С. Бородулин, И. В. Чуднов, М. В. Трофимова; заяв. и патентообл. ОАО «Московский машиностроительный экспериментальный завод — композиционные технологии». — № 2010132713/02; заявл. 05.08.2010, опублик. 20.08.2012. Бюл. № 23.

5. *Мещанов Г. И.* Некоторые вопросы технологии, оборудования и производства теплостойких провод с пленочной полиимидно-фторопластовой изоляцией / Г. И. Мещанов, Б. М. Резвин // Кабели и провода. — 2011. — № 2 (327). — С. 14–18.

6. *Карпов Я. С.* Соединения деталей и агрегатов из композиционных материалов: монография / Я. С. Карпов. — Харьков: ХАИ, 2006. — 359 с.

7. *Вейц В. Л.* Динамика и оптимизация механизмов с гибкими связями: монография / В. Л. Вейц, И. Ш. Бейлин, В. М. Меркин, В. М. Петров; под общ. ред. проф. В. Л. Вейца. — Изд. 2. — СПб.: Изд-во СПбГАСУ, 2017. — 500 с.

8. *Комков М. А.* Спиральная намотка концевых участков композитных оболочек цилиндрической и конической формы / М. А. Комков, В. А. Тарасов, А. С. Бородулин // Вестник Московского государственного технического университета им. Н. Э. Баумана. Серия: Машиностроение. — 2012. — № 4. — С. 78–85.

9. *Vasiliev V. V.* Anisogrid composite lattice structures – Development and aerospace applications / V. V. Vasiliev, V. A. Barynin, A. F. Razin // Composite Structures. — 2012. — Vol. 94. — Is. 3. — Pp. 1117–1127. DOI: 10.1016/j.compstruct.2011.10.023.

10. *Комков М. А.* Оптимизация угла намотки углепластика на металлический лайнер криогенного трубопровода / М. А. Комков, Д. А. Потапов, А. А. Кудрявцев // Инженерный журнал: наука и инновации. — 2017. — № 9 (69). — С. 5. DOI: 10.18698/2308-6033-2017-9-1673.

REFERENCES

1. Anisimov, A.V., V.E. Bakhareva, I.V. Blyshko, et al. *Sovremennye mashinostroitel'nye materialy. Nemetallicheskie materialy: Sprav.* Edited by I.V. Gorynina, and A.S. Oryshchenko. SPb.: NPO «Professional», 2012.
2. Gluhii, Vladimir Nikolaevich, Vladimir Markovich Petrov, and Natalja Jurevna Sojtu. "Determination of elasticity constants with anisotropy of properties of composite materials used for winding the responsible shell and beam structures in shipbuilding and port infrastructure." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova* 2(36) (2016): 137–142. DOI: 10.21821/2309-5180-2016-8-2-137-142.
3. Beleckij, Evgenij Nikolaevich. "Different levels of modeling of complex structures marine power plants, the individual elements of which made of composite polymer materials." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova* 1(35) (2016): 138–144. DOI: 10.21821/2309-5180-2016-8-1-138-144.
4. Litvinov, V. B., M. S. Toksanbaev, A. V. Artem'ev, A. S. Borodulin, I. V. Chudnov, and M. V. Trofimova. RU 2 458 791 C2, IPC B29C 44/12, B29C 51/12, B29C 63/14. Sposob i osnastka dlya izgotovleniya osesimmetrichnykh pustotelykh obolochek (obolochek vrashcheniya) iz polimernykh kompozitsionnykh materialov. Russian Federation, assignee. Publ. 20 Aug. 2012.
5. Meshchanov, G.I., and B.M. Rezvin. "Nekotorye voprosy tekhnologii, oborudovaniya i proizvodstva teplostoikikh provod s plenochnoi poliimidno-ftoroplastovoi izolyatsiei." *Kabeli i provoda* 2(327) (2011): 14–18.
6. Karpov, Ya.S. *Soedineniya detalei i agregatov iz kompozitsionnykh materialov. Monografiya.* Khar'kov: KhAI, 2006.
7. Veits, V.L., I.Sh. Beilin, V.M. Merkin, and V.M. Petrov. *Dinamika i optimizatsiya mekhanizmov s gibkimi svyazyami: monografiya.* Edited by prof. V.L. Veitsa. 2-nd ed. SPb.:Izd-vo SPGASu, 2017.
8. Komkov, M.A., V.A. Tarasov, and A.S. Borodulin. "Spiral winding of ends of composite shells with cylindrical and conical shapes." *Herald of the Bauman Moscow State Technical University. Series Mechanical Engineering* 4 (2012): 78–85.
9. Vasiliev, Valery V., Vyacheslav A. Barynin, and Alexander F. Razin. "Anisogrid composite lattice structures—Development and aerospace applications." *Composite structures* 94.3 (2012): 1117–1127. DOI: 10.1016/j.compstruct.2011.10.023.
10. Komkov, M.A., D.A. Potapov, and A.A. Kudryavtsev. "Optimizing the angle of winding carbon fiber reinforced plastic on the metal liner of the cryogenic pipeline." *Engineering Journal: Science and Innovation* 9(69) (2017): 5. DOI: 10.18698/2308-6033-2017-9-1673.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Белецкий Евгений Николаевич —
кандидат технических наук, главный технолог
АО «Концерн «НПО» Аврора»
194021, Российская Федерация, Санкт-Петербург,
ул. Карбышева, 15
e-mail: famalien@mail.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Beletskii, Evgenii N. —
PhD, chief technologist
Concern Avrora Scientific and Production Association JSC
15 Karbyshev Str., St. Petersburg, 194021,
Russian Federation
e-mail: famalien@mail.ru

Статья поступила в редакцию 15 ноября 2017 г.
Received: November 15, 2017.

RESEARCH OF SURFACE ROUGHNESS INFLUENCE ON WARE RESISTANT CHARACTERISTICS OF SHIP MACHINERY AND MECHANISMS PARTS' SURFACE LAYER PROCESSED WITH DIFFERENT METHODS

Z. Z. Sharifov, C. M. Aliyev, A. M. Guliyev

Azerbaijan State Marine Academy, Baku, Azerbaijan Republic

The article deals with the influence of the surface roughness, processed by different technological methods to ware resistant characteristics' of the surface layer of ship machines and details high-precision parts. As the technological methods of processing parts was used rotary cutting, grinding with vibration damping, rotating honing, lapping with metered readout surface layer material and the flexible rolling.

It is established that the use of a rotary cutting method as a finishing treatment forms not only additional deformed high ware resistant surface layer of parts, at the same time is provided high productivity. The process of grinding with vibration damping significantly reduces the transfer of the abrasive particles on the treated surface, improves accuracy, quality and surface layer ware resistant characteristics. During the rotary honing discontinuity of single grain cutting is combined with continuity of chip formation process, practically no metal buildup to the working surface of the cutting part of the tool occurs, the temperature in the cutting area is reduced, which brings to get details with surface layer of high-quality ware resistant. During the lapping of the surface layer material the optimum value of the highly deformable surface layer thickness is provided. Because of the possible regulation abrasive action to the treated surface, reliable ware resistant layer could be obtained. Flexible rolling enables the implementation of non-rigid thin-walled parts processing with stable, secure, adjustable forces without degrading their accuracy, quality and ware resistant characteristics.

Keywords: ship machines and mechanisms, parts, processing, methods, roughness, surface layer, wear.

For citation:

Sharifov, Zahid Z., Chingiz M. Aliyev, and Alimardan M. Guliyev. "Research of surface roughness influence on ware resistant characteristics of ship machinery and mechanisms parts' surface layer processed with different methods." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova* 9.6 (2017): 1262–1272. DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-6-1262-1272.

УДК 621-192; 621.81-192

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ШЕРОХОВАТОСТИ ПОВЕРХНОСТИ НА ИЗНОС ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ ДЕТАЛЕЙ СУДОВЫХ МАШИН И МЕХАНИЗМОВ, ОБРАБОТАННЫХ РАЗЛИЧНЫМИ МЕТОДАМИ

З. З. Шарифов, Ч. М. Алиев, А. М. Кулиев

Азербайджанская Государственная морская академия,
Баку, Азербайджанская Республика

В статье рассматриваются вопросы влияния шероховатости поверхности, обработанных различными технологическими методами на износ поверхностного слоя высокоточных деталей судовых машин и механизмов. В качестве технологических методов обработки деталей использовано ротационное резание, шлифование с виброгашением, ротационное хонингование, притирка с дозированным съемом материала поверхностного слоя и эластичное раскатывание.

Установлено, что применение метода ротационного растачивания в качестве финишной обработки формирует на поверхности деталей дополнительно деформированный высокоизносостойкий поверхностный слой одновременно обеспечивая высокую производительность. Процесс шлифования с виброгашением существенно снижает перенос абразивных частиц на обрабатываемую поверхность, повышает точностные и качественные показатели поверхностного слоя. При ротационном хонинговании прерывистость резания единичных зерен сочетается с непрерывностью процесса стружкообразования. Налипания металла на рабочую поверхность режущей части инструмента практически не происходит,

температура в зоне резания снижается, что приводит к получению высококачественного износостойкого поверхностного слоя деталей. При притирке с дозированным съемом материала поверхностного слоя обеспечивается оптимальная величина толщины сильно деформируемого поверхностного слоя из-за возможности регулирования абразивного воздействия на обрабатываемую поверхность, которая способствует получению надежного износостойкого слоя. Эластичное раскатывание позволяет осуществить обработку нежестких тонкостенных деталей стабильными, уравновешенными, регулируемые силами, не ухудшая их точностные, качественные и износостойкостные характеристики.

Ключевые слова: судовые машины и механизмы, детали, обработка, методы, шероховатость, поверхностный слой, износ.

Для цитирования:

Шарифов З.З. Исследование влияния шероховатости поверхности на износ поверхностного слоя деталей судовых машин и механизмов, обработанных различными методами / З.З. Шарифов, Ч.М. Алиев, А.М. Кулиев // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2017. — Т. 9. — № 6. — С. 1262–1272. DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-6-1262-1272.

Введение

Показатели надежности и долговечности оцениваются и выбираются с учетом основных характеристик судовых машин и механизмов, режимов их работы, условий эксплуатации и т. д. Основной и наиболее универсальной характеристикой является вероятность безотказной работы объекта, под которой понимается объективная возможность того, что в пределах заданной наработки отказа объекта не возникает [1].

Суда различных назначений характеризуются многообразием различных машин и оборудования, механизмов и агрегатов, приспособлений и инструментов, надежность которых является основным фактором как при обеспечении безопасности людей и их имущества, так и при выполнении поставленных разнообразных технологических задач.

Судовые машины и механизмы, существенно различаются по назначению, и ими выполняются многочисленные разнообразные технологические задачи. Судовые машины и механизмы работают в различных атмосферных и климатических условиях. На их основные узлы и детали существенные влияния оказывают влага, тепло, холод, пыль песка, свет, радиация, пониженное и высокое давление, соли различных типов, морская вода и т. д. На работоспособность судовых машин и механизмов могут оказать влияние также непредвиденные случайные процессы, зависящие от перегрузки и условий эксплуатации. Существенное влияние на надежность судовых машин и механизмов оказывают износостойкость их ответственных деталей и материалы, из которых они изготовлены.

Износ является результатом силового взаимодействия поверхностей трения и является одним из основных факторов для анализа физико-механических процессов, которые происходят на поверхностном слое деталей машин, что непосредственно связано с величиной площадки контакта и давлением, влияющим на эту площадь.

Методы проведения исследований и используемые материалы

Автором [2] рассматривается конкретная задача теории упругости для шероховатых поверхностей, принимается линейный закон деформирования микронеровностей поверхностного слоя, подробно излагаются закономерности деформирования и приводятся основные зависимости. Исследованиями [3] – [5] установлено, что зависимость между сжимающим усилием и деформацией микронеровностей носит нелинейный характер. В работе [6] уравнения поверхностей взаимодействующих тел вала и втулки до деформации записываются в виде:

$$y_1 = f_1(x); y_2 = -f_2(x). \quad (1)$$

Начало координат устанавливается в точке первоначального касания вала и втулки. Под действием прижимающих сил вал получает перемещение σ_1 , втулка — σ_2 . Точки, расположенные на поверхности вала, и точки, находящиеся на поверхности втулки, получают соответствующее перемещение v_1 и v_2 в направлении оси ординат.

Поскольку координаты точек вала и втулки после вступления в контакт становятся идентичными, можно записать условия перемещения втулки и вала в виде

$$-v_1 + f_1(x) - \delta_1 = v_2 - f_2(x) + \delta_2, \quad (2)$$

где δ_1 — поступательное перемещение точек вала; δ_2 — соответствующее перемещение точки втулки; $f_1(x)$ — функция, описывающая геометрию поверхности [6]; $f_2(x)$ — функция, характеризующая геометрию внутренней поверхности втулки [6].

Величины v_1 и v_2 характеризуют смещение в результате износа поверхностей вала и втулки [6]. Используя различные методики, можно определить величину износа поверхностей как втулки, так и вала. Известно, что когда износ является следствием различных причин, связанных с ухудшением показателей надёжности машин и механизмов, часто используется нормальное распределение. Нормальное распределение обычно считают предельным для распределения Пуассона, биномиального, гамма-распределения и др. [7]. Объем выборки деталей при проведении экспериментов составляет 100 и более единиц.

Нормальное распределение характеризуется интегральной функцией

$$F(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^x \exp\left[-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}\right] dx \quad (3)$$

или плотностью распределения

$$f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}\right]. \quad (4)$$

Для нормального распределения

$$M(x) = \mu, \quad D(x) = \sigma^2, \quad V = \frac{\sigma}{\mu}, \quad (5)$$

где $-\infty < \mu < +\infty$ и $\sigma > 0$ — параметры сдвига и масштаба.

Если изменение случайной величины будет охарактеризовано только положительными значениями, то следует принимать во внимание условия усечённого нормального распределения и произвести некоторые коррективы в расчётах.

Для определения изменения величины износа поверхностного слоя в зависимости от шероховатости поверхности деталей, обработанных различными методами, и условий работы судовых машин и механизмов, можно использовать разные законы распределения, такие как закон Симпсона, усеченное нормальное распределение, закон Вейбулла, закон Максвелла, логарифмическое нормальное распределение и другие методы математической статистики.

Для определения характеристик износа поверхностей использованы детали, обработанные ротационном растачиванием, шлифованием с виброгашением, ротационном хонингованием, притиркой с дозированным съёмом материала поверхностного слоя и эластичным раскатыванием. В качестве обрабатываемого материала приняты стали марки 38ХМЮА, Ст30Х13, Ст40Х и Ст45.

Для проведения экспериментов использованы детали из выше указанных материалов со следующими размерами: диаметр наружной поверхности — 55 мм, внутренней поверхности — 45 мм, длина $l = 300$ мм. Точность обработанных деталей находилась в пределах восьмого и девятого квалитетов. Шероховатость поверхностного слоя измерялась с помощью профилометра — профилографа мод. 201 с записью профилограммы обработанных поверхностей.

Для проведения экспериментальных исследований по износу поверхностей деталей было использовано специальное устройство, сконструированное на базе станка-качалки СКН-5. Испытания проводились при одинаковых условиях и режимах для всех тестируемых образцов. Конструкция, принцип работы притирочного устройства, а также условия и режимы работы проведения испытаний подробно изложены в работах [4] и [6].

Для определения величины износа использован *метод микрометрического измерения*. Измерение проводилось микрометром, индикаторным нутромером, а также с помощью рычажно-оптических приборов и инструментального микроскопа. В зависимости от их точности охватываемые и охватываемые поверхности деталей измерялись микрометром, оптиметром и индикаторным нутромером. Точность измерения в зависимости от применяемого измерительного средства составляет от 0,01 до 0,001 мм.

Результаты проведенных исследований

Проведенными исследованиями было установлено, что износ поверхностей деталей существенно зависит от шероховатости поверхности R_a . Увеличение шероховатости этой поверхности, обработанной ротационным растачиванием от 0,3 до 2,0 мкм, увеличивает износ поверхностного слоя I в 2 раза, т. е. до 14 мкм (рис. 1, а). При этом детали, изготовленные из различных сталей, показывают разные характеристики. Например, износ деталей, изготовленных из сталей 38ХМЮА, на 3 – 4 мкм меньше, чем деталей стали 45. Несмотря на идентичность условий обработки, шероховатость поверхностей различных марок сталей имеет разные величины, что непосредственно связано с физико-механическими свойствами материалов деталей, из которых они изготовлены. Кроме того, существенное значение имеет также и величина микротвердости поверхностного слоя деталей, которые, несмотря на одинаковый вид обработки для различных материалов, имеют разную величину и глубину залегания по материалу поверхностного слоя.

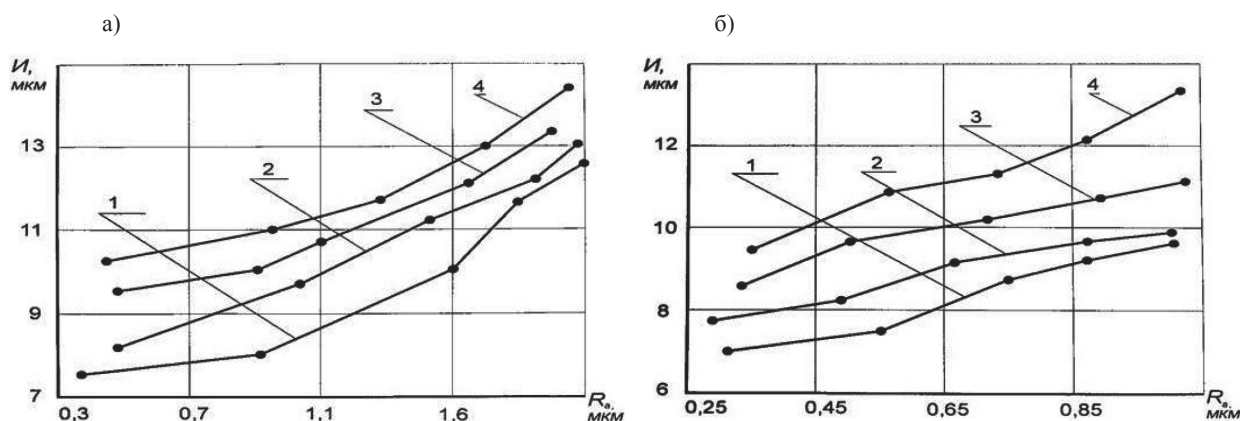


Рис. 1. Зависимость износа деталей I от шероховатости поверхности R_a :

а — поверхность обработана методом ротационного резания;

б — поверхность обработана методом шлифования с виброгашением

Условные обозначения: 1, 2, 3, 4 — соответственно: Ст38ХМЮА, Ст30Х13, Ст45 и Ст40Х

Твёрдость и износ связаны между собой обратно пропорциональной зависимостью и поэтому для повышения износостойкости необходимо также повышение микротвёрдости поверхностного слоя. Ротационное резание является силовым процессом и характеризуется большими составляющими сил резания, что приводит к дополнительным пластическим деформациям материала поверхностного слоя деталей. Используя параметры режимов резания и геометрические параметры ротационного инструмента, можно в достаточно широких пределах регулировать величину шероховатости R_a , остаточного напряжения σ_0 и микротвердости H поверхностного слоя, которые обеспечивают низкую склонность к схватыванию и высокую длительную прочность поверхностей деталей.

Как известно [6], структурное состояние металла характеризуется фазовым составом, типом и характером кристаллической решётки, числом и характером распределения дефектов. Сопротивление изнашиванию металлов в значительной мере определяется структурой и сочетанием свойств локальных микрообъемов. Весьма существенное влияние на износостойкость оказыва-

ет кристаллическая решетка и ориентация направления скольжения при трении по отношению к различным кристаллическим направлениям. Указанные характеристики и их основные показатели в основном формируются в процессе механической обработки деталей. Поэтому выбор того или иного метода обработки и установление их оптимальных режимов имеет существенное значение для снижения износа поверхностей деталей.

Применение метода ротационного резания в качестве финишной обработки не только формирует на поверхности деталей дополнительно деформированный поверхностный слой, но и одновременно обеспечивает высокую производительность. Ротационное резание может быть использовано как предварительная, так и как окончательная технологическая операция.

Зависимость износа поверхностного слоя I от шероховатости R_a поверхности деталей, обработанных шлифованием с виброгашением, приведена на рис. 1, б. Анализ результатов экспериментов показывает, что интенсивность износа поверхностей деталей, обработанных шлифованием с виброгашением, несколько меньше по сравнению с ротационным резанием. Сравнительно малая интенсивность износа поверхностей деталей, обработанных шлифованием с виброгашением, по сравнению с ротационным резанием, связана с меньшей величиной шероховатости поверхности при шлифовании с виброгашением. Другие физико-механические характеристики поверхностей, обработанных ротационным резанием и шлифованием с виброгашением, практически одинаковы. Для ротационного резания и шлифования с виброгашением характерны растягивающие остаточные напряжения и идентичные микротвердости поверхностного слоя.

Результатами многочисленных исследований доказано [6] – [8], что при обычном шлифовании частицы абразивного круга переносятся на поверхность обработки. Указанная закономерность характерна и для шлифования с виброгашением, но в меньшей степени. Перенос частицы абразивного круга часто является одной из основных причин резания — царапания поверхностного слоя деталей. Интенсивное царапание создает на поверхностном слое дополнительные очаги напряжений. Учитывая, что для процесса шлифования также характерны растягивающие остаточные напряжения, из-за высокой температуры в зоне резания, интенсивное изнашивание поверхностей деталей, обработанных шлифованием с виброгашением, по сравнению с «холодными» методами обработки (хонингование, притирка, раскатывание), вполне закономерно. Кроме того, абразивные частицы, насаженные на обработанные поверхности в процессе шлифования, переносятся и на контактирующие поверхности другой детали пары трения и царапают их.

Принимая во внимание ранее изложенное, при выборе пары трения необходимо учитывать как материалы деталей, из которых они изготовлены, так и методы обработки контактирующих поверхностей деталей. Иногда тот или иной метод обработки может быть единственным для достижения требуемой точности, качества поверхности и износостойкости. С этой точки зрения предлагаемый процесс — шлифование с виброгашением — является одним из прогрессивных методов механической обработки, позволяющих существенно снизить перенос абразивных частиц на обрабатываемую поверхность, повысить точностные и качественные показатели поверхностей, улучшить износостойкостные характеристики поверхностного слоя из-за существенного снижения вибрации, возникающие при выполнении технологической операции.

Одним из прогрессивных методов механической обработки, значительно повышающих износостойкостные показатели рабочих поверхностей деталей, является *ротационное хонингование* [9], [10]. Отличительной особенностью этого метода, по сравнению с обычным хонингованием, является наличие дополнительного рабочего движения режущей части (ролика) ротационной головки.

Если при известных методах хонингования имеется три основных движения: вращательное со скоростью $V_{вр}$ вокруг оси обрабатываемого отверстия, возвратно-поступательное вдоль оси обрабатываемого отверстия со скоростью $V_{в-п}$, а также радиальные перемещения брусков со скоростью $V_{рад}$ по мере съема металла поверхностного слоя, то при ротационном хонинговании отверстий режущие алмазные ролики совершают движение самовращения с угловой скоростью ω_p вокруг своей оси [9]. При этом частота самовращения режущих алмазных роликов в несколько раз

больше частоты оборотов шпинделя станка. В процессе обработки рабочая поверхность алмазных роликов постоянно обновляется из-за вращения их вокруг своей оси.

Одним из основных преимуществ ротационного хонингования является то, что во время холостого пробега режущая часть алмазных роликов постоянно промывается смазочно-охлаждающей жидкостью, которая в процессе обработки уносит с собой отходы продуктов обработки, в том числе отрывающиеся частицы алмаза. Указанный процесс существенно уменьшает перенос алмазных частиц на рабочую поверхность деталей, что приводит к снижению износа поверхности деталей.

Влияние шероховатости R_a поверхностного слоя деталей, обработанных ротационным хонингованием на износ поверхности I , показано на рис. 2, а, откуда видно, что интенсивность износа поверхностей деталей, обработанных этим методом, намного меньше по сравнению с ранее рассмотренными методами обработки. Например, увеличение шероховатости поверхности R_a от 0,10 мкм до 0,70 мкм и износ поверхностей деталей увеличиваются приблизительно для стали 38ХМЮА на 4–6 мкм, для стали 30Х13 на 5–7 мкм, для стали 40Х на 6–7 мкм, для стали 45 на 7–10 мкм.

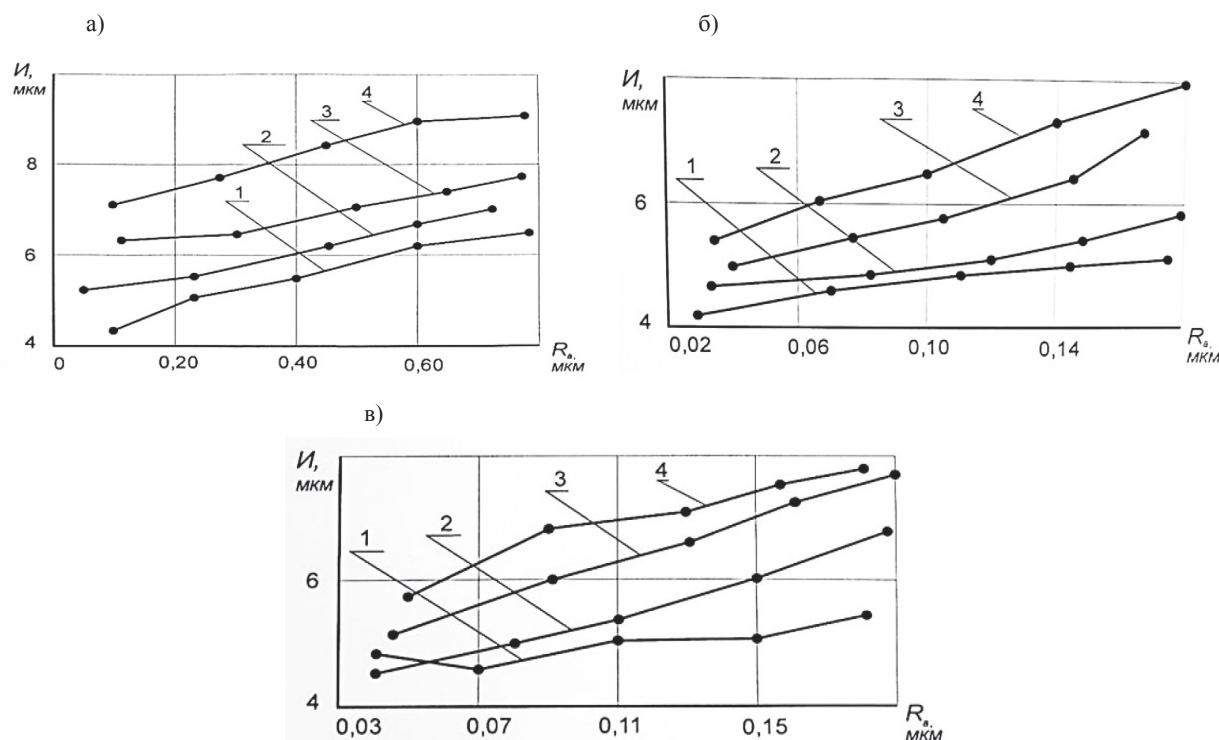


Рис. 2. Зависимость износа деталей I от шероховатости поверхности R_a :

а — поверхность обработана методом ротационного хонингования);

б — поверхность обработана методом дозированной притирки;

в — поверхность обработана методом эластичного раскатывания

Условные обозначения: 1, 2, 3, 4 — соответственно Ст38ХМЮА, Ст30Х13, Ст45 и Ст40Х

Основным недостатком обычного алмазного хонингования является срез связки сходящей сливной стружкой при обработке стали и других вязких материалов. Этот недостаток устраняется при ротационном хонинговании: стружка выбрасывается из зоны резания благодаря линейному контакту инструмента с детали. Одновременно снижаются интенсивность адгезионного и диффузионного износа алмазов из-за кратковременности контакта и более эффективного охлаждения роликов, а также температура нагрева деталей, что приводит к образованию на поверхностном слое деталей снимающих остаточных напряжений, которые существенно снижает износ контактных поверхностей.

Прерывистость резания единичных зерен при ротационном хонинговании сочетается с непрерывностью процесса стружкообразования, налипания металла на рабочую поверхность алмазных роликов практически не происходит. Указанное обстоятельство способствует снижению температуры в зоне резания, что приводит к улучшению физико-механических свойств поверхностного слоя и является дополнительным стимулом повышения износостойкости поверхностей деталей.

Результаты исследований показывают, что при одинаковых шероховатостях поверхностей, обработанных притиркой с дозированным съемом материала поверхностного слоя, износостойкость деталей из различных марок сталей имеют разные значения (рис. 2, б). При увеличении шероховатости R_a от 0,035 до 0,075 мкм износ поверхностей I деталей увеличивается незначительно или практически не изменяется. С дальнейшим увеличением исходной шероховатости увеличивается и износ поверхностей деталей.

Притирка с дозированным съемом материала поверхностного слоя, как и обычная притирка, является абразивным методом финишной обработки. Абразивные частицы притирочных паст имеют самые разнообразные геометрические формы. Отличительной особенностью этого метода является то, что он применяется только как окончательная операция. Припуски на обработку, притирочная паста, точность обработки, качества поверхности и ее составляющие, время обработки и другие показатели определяются заранее. Для осуществления этого метода разрабатывается специальная методика, конструкция режущего инструмента и технологическая оснастка. При этом методе наличие острых режущих кромок и точность формы абразивных частиц не оказывают определяющего влияния на формирование поверхностного слоя, поэтому частицы износа составляют определенный объем образующихся неровностей. Абразивные действия сводится к резанию — царапанию, образующиеся в поверхностном слое неровности не превышают размеры абразивных частиц притирочных паст.

При притирке с дозированным съемом материала поверхностного слоя обеспечивается оптимальная толщина деформируемого поверхностного слоя из-за возможности регулирования абразивного воздействия на обрабатываемую поверхность, которая способствует снижению износа поверхностного слоя деталей. Образующиеся неровности на поверхностном слое формируются под воздействием местных деформаций частиц и зависят также от состояния предварительно подготовленных поверхностей под притирку. Первичные деформации могут быть устранены полностью или частично в зависимости от требований, предъявляемых к качеству поверхности.

Одним из основных методов механической обработки, существенно снижающим износ поверхностей деталей, является раскатывание. Процесс раскатывания можно сравнить с такими методами отделочной обработки, как алмазное сглаживание, хонингование, тонкое шлифование, тонкое точение, полирование, суперфиниширование. Однако существенным недостатком процесса раскатывания является то, что оно характеризуется повышенными силами, которые не позволяют ее применение при обработке высокоточных нежестких тонкостенных деталей типа «глаз», подшипников скольжения, тонкостенных втулок и т. д. Для уменьшения вредного влияния повышенных сил обработки при раскатывании на точностные и качественные показатели ответственных нежестких тонкостенных деталей разработан специальный метод — *эластичное раскатывание*. Особенностью эластичного раскатывания является то, что деформирующие элементы раскатной головки расположены на специальном дозирующем регулирующем устройстве, которое позволяет осуществлять раскатывание поверхностей деталей со стабильными уравновешенными силами обработки [11], [12].

На рис. 2 приведены результаты экспериментов влияния шероховатости R_a раскатанных поверхностей на износостойкость I поверхностного слоя деталей. Как видно из рис. 2, в, поверхности, обработанные методом эластичного раскатывания, показывают наилучшие износостойкие характеристики по сравнению с другими исследованными методами финишной обработки. Увеличение шероховатости R_a в пределах от 0,02 до 0,08 мкм фактически не оказывает существенного влияния на уменьшение / увеличение износа I поверхностей. Незначительное повышение износа поверхностного слоя наблюдается при увеличении шероховатости поверхности более

0,10 мкм. Наилучшими износостойкостными характеристиками обладают стали марки 38ХМЮ и Ст30Х13, наименьшими — Ст45.

Обсуждение полученных результатов

Результаты проведенных исследований показывают, что поверхности, обработанные различными методами, несмотря на идентичность условий, имеют различия как по шероховатости поверхности, так и по физико-механическим характеристикам поверхностного слоя. При этом дефекты, полученные по качественным показателям поверхностного слоя, впоследствии оказывают существенное влияние на износостойкостные характеристики контактирующих поверхностей деталей. Износостойкостные характеристики контактирующих поверхностей деталей пары трения непосредственно связаны с макро- и микрогеометрией поверхностей и приложенными к ним нагрузками. Износ поверхности происходит из-за срезания микрогребешков, возникающих после механической обработки.

Результатами исследований [8] установлено, что металлические поверхности имеют шероховатость на атомном уровне и при соприкосновении контактируют через наиболее выступающие неровности. У металлов, находящихся в обычной атмосфере, роль таких неровностей играют частицы пыли, которые при малых нагрузках могут воспринимать большую часть нагрузки или даже всю её целиком. Несколько иная ситуация возникает в случае, если единичные области контакта деформируются упруго. Для металлических поверхностей при данных обстоятельствах микронеровности могут быть расплющены плоскостью, и площадь истинного контакта определяется законом упругой, а не пластической деформации [4]. Методика измерения основных параметров шероховатости поверхности подробно изложена в работе [10]. Величина износа поверхностей деталей (вала и втулки) соединений определяется как разница их диаметров до и после экспериментов, т. е. устанавливается линейный износ.

В большинстве случаев при использовании механических методов обработки, особенно при абразивных, частицы материала инструмента переносятся на обрабатываемую поверхность, что приводит к интенсификации износа поверхностного слоя деталей трущихся пар. При изготовлении высокоточных ответственных деталей судовых машин и механизмов основным и обязательным условиям должен быть тщательный выбор соответствующих видов механической обработки, которые обеспечивают оптимальные параметры шероховатости R_a , остаточного напряжения σ_0 и микротвердости H поверхностного слоя. Результаты проведенных исследований показывают, что для поверхностей трения не всегда характерно резание-царапание. При высокой скорости скольжения происходит размягчение материала поверхностного слоя из-за высоких температур, возникающих в зоне контакта поверхностей. В результате пластическое течение имеет преимущество над резанием-царапанием.

Основополагающими факторами, определяющими износ поверхностного слоя деталей машин, являются шероховатость поверхности R_a и ее основные составляющие. Управляя технологическими параметрами процесса притирки с дозированным съемом материала поверхностного слоя, можно получить оптимальный микрорельеф контактных поверхностей, которые обеспечивают наибольшую износостойкость деталей судовых машин и механизмов. Результаты многочисленных наблюдений свидетельствуют о том, что основными показателями, характеризующими износостойкость поверхностей деталей пар трения судовых машин и механизмов, являются качество поверхностного слоя и их точность, которые непосредственно характеризуют зазоры между деталями пары трения, толщину масляной пленки, длину опорной площади, распределение нагрузки по контактным поверхностям [11] – [18].

Выводы

1. Следует отметить, что повышение твердости поверхностного слоя не всегда обеспечивает наибольшую износостойкость. В связи с этим необходимо выполнить поэтапную подготовку поверхностей деталей. При этом существенную роль играет выбор оптимальных сочетаний технологических операций с учетом закономерностей технологической наследственности [10], [12].

2. Одним из основных условий, определяющих наибольшую износостойкость поверхностей деталей, является сочетание твердости с шероховатостью и физико-механическими свойствами поверхностного слоя.

3. Результаты проведенных исследований показывают, что наименьший износ поверхности получается тогда, когда поверхностные слои деталей, обработанных различными технологическими методами, по своим качественным показателям соответствуют поверхностям после обработки. Конкретным твердостям поверхностного слоя деталей всегда должно соответствовать равновесные шероховатости поверхности, обеспечивающие равномерное контактное давление.

4. Существенное влияние на износ поверхностей деталей оказывают направления следов обработки, отклонения макрогеометрии поверхностей (изогнутость, овальность, конусность и др.), обеспечиваемые при помощи различных технологических методов.

5. Для получения поверхностей, имеющих повышенные износостойкостные характеристики, следует разрабатывать и исследовать новые прогрессивные технологические методы и успешно использовать их в условиях производства. К таким методам можно отнести ротационное резание, шлифование с виброгашением, ротационное хонингование, притирку с дозированным съемом материала поверхностного слоя, эластичное раскатывание и др. [13], [14].

6. Оптимальными величинами шероховатости поверхности, обеспечивающие наименьший износ поверхностей деталей находиться в пределах $R_a = 0,04 \dots 0,08$ мкм (см. рис. 1 и 2).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Сулейманов П. Г. Разработка методики оценки надежности машин и оборудования эксплуатируемых в чрезвычайных ситуациях и экстремальных условиях / П. Г. Сулейманов // Теоретическая и прикладная механика. — 2016. — № 3. — С. 140–147.
2. Штаерман И. В. Контактная задача теории упругости / И. В. Штаерман. — М.-Л.: Гостехиздат, 1949. — 320 с.
3. Демкин И. Б. Контактирование шероховатых поверхностей / И. Б. Демкин. — М.: Наука, 1970. — 227 с.
4. Сулейманов П. Г. Триботехнические характеристики деталей машин эксплуатируемых в экстремальных условиях / П. Г. Сулейманов. — Баку: Наука, 2013. — 186 с.
5. Джанахмедов А. Х. Синергетика и фракталы в трибологии / А. Х. Джанахмедов, О. А. Дышин, М. Я. Джавадов. — Баку: Наука, 2014. — 504 с.
6. Гасанов Ю. Н. Регулирование триботехнических характеристик поверхностей деталей / Ю. Н. Гасанов. — Баку: Наука, 2001. — 315 с.
7. Гафаров А. М. Исследование влияния характеристик поверхностного слоя на износ деталей обработанных различными методами / А. М. Гафаров, З. З. Шарифов, Ч. М. Алиев, А. М. Кулиев // Теоретическая и прикладная механика. — 2016. — № 4. — С. 118–125.
8. Гафаров В. А. Шлифование с виброгашением / В. А. Гафаров. — Баку: Наука, 2006. — 124 с.
9. Гафаров А. М. Исследование кинестатики характера взаимодействия режущих роликов с обрабатываемой поверхностью при ротационном хонинговании / А. М. Гафаров, П. Г. Сулейманов, В. А. Гафаров, Ф. М. Калбиев // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. — 2015. — № 9 (666). — С. 26–33.
10. Гафаров А. М. Ротационное хонингование / А. М. Гафаров, Г. М. Бабаев. — Баку: Наука, 1999. — 132 с.
11. Пат. J20160014 Азербайджанская Республика, ГКМР2013 (2013.02). Раскатная головка / А. М. Гафаров, П. Г. Сулейманов, Ф. М. Калбиев; заяв. Академия МЧС Азербайджанской Республики. — № a20130012; заяв. 25.01.2013; опубл. 03.03.2016.
12. Гафаров А. М. Раскатывание тонкостенных деталей / А. М. Гафаров, Г. Н. Аббасова. — Баку: Наука, 2006. — 131 с.
13. Муратов Р. А. Механизм разжима хонинговальных брусков с переменным давлением по длине заготовки / Р. А. Муратов, К. Р. Муратов // СТИН. — 2007. — № 2. — С. 11–13.
14. Муратов К. Р. Методы хонингования высокоточных отверстий / К. Р. Муратов, Е. А. Гашев // Современные проблемы науки и образования. — 2014. — № 5. — С. 288.

15. Солер Я. И. Обеспечение точности формы инструментов при плоском шлифовании кругом Norton Vitrim / Я. И. Солер, В. К. Нгуен // Вестник машиностроения. — 2016. — № 11. — С. 51–58.

16. Гафаров А. М. Исследование качества поверхностей деталей, обработанных ротационным хонингованием и работающих в экстремальных условиях / А. М. Гафаров, П. Г. Сулейманов, В. А. Гафаров // Вестник машиностроения. — 2016. — № 11. — С. 63–68.

17. Гафаров А. М. Влияние технологических параметров на износ поверхностного слоя деталей машин, эксплуатируемых в экстремальных условиях / А. М. Гафаров, П. Г. Сулейманов, В. А. Гафаров // Химическое и нефтегазовое машиностроение. — 2013. — № 3. — С. 46–48.

18. Гафаров А. М. Исследование влияния основных параметров ротационного метода обработки на качество поверхности деталей машин, эксплуатируемых в экстремальных условиях / А. М. Гафаров, П. Г. Сулейманов, Ф. М. Калбиев, В. А. Гафаров // Технология машиностроения. — 2017. — № 4. — С. 17–24.

REFERENCES

1. Suleimanov, P.G. “Razrabotka metodiki otsenki nadezhnosti mashin i oborudovaniya ekspluatiruemykh v chrezvychaynykh situatsiyakh i ekstremal’nykh usloviyakh.” *Teoreticheskaya i prikladnaya mekhanika* 3 (2016): 140–147.

2. Shtaerman, I.V. *Kontaktnaya zadacha teorii uprugosti*. M.-L.: Gostekhizdat, 1949.

3. Demkin, I.B. *Kontaktirovanie sherokhovatykh poverkhnostei*. M.: Nauka, 1970.

4. Suleimanov, P.G. *Tribotekhnicheskie kharakteristiki detalei mashin ekspluatiruemykh v ekstremal’nykh usloviyakh*. Baku: Nauka, 2013.

5. DzhanaKhmedov, A.Kh., O.A. Dyshin, and M.Ya. Dzhavadov. *Sinergetika i fraktaly v tribologii*. Baku: Nauka, 2014.

6. Gasanov, Yu.N. *Regulirovanie tribotekhnicheskikh kharakteristik poverkhnostei detalei*. Baku: Nauka, 2001.

7. Gafarov, A.M., Z.Z. Sharifov, Ch.M. Aliev, and A.M. Kuliev. “Issledovanie vliyaniya kharakteristik poverkhnostnogo sloya na iznos detalei obrabotannykh razlichnymi metodami.” *Teoreticheskaya i prikladnaya mekhanika* 4 (2016): 118–125.

8. Gafarov, V.A. *Shlifovanie s vibrogasheniem*. Baku: Nauka, 2006.

9. Gafarov, Aidyn Mamish, Panakh Gusein Suleimanov, Vugar Aidyn Gafarov, and Fargan Mammad Kalbiev. “Kinetostatic Analysis of the Interaction between the Cutting Rolls and the Machined Surface in Rotary Honing.” *Proceedings of Higher Educational Institutions. Machine Building* 9(666) (2015): 26–33.

10. Gafarov, A.M., and G.M. Babaev. *Rotatsionnoe khoningovanie*. Baku: Nauka, 1999.

11. Gafarov, A.M., P.G. Suleimanov, and F.M. Kalbiev. J20160014, GKSMR2013 (2013.02). Raskatnaya go-
lovka. The Republic of Azerbaijan, assignee. Publ. 3 March 2016.

12. Gafarov, A.M., and G.N. Abbasova. *Raskatyvanie tonkostennykh detalei*. Baku: Nauka, 2006.

13. Muratov, R.A., and K.R. Muratov. “Mekhanizm razzhima khoningoval’nykh bruskov s peremennym davleniem po dline zagotovki.” *STIN* 2 (2007): 11–13.

14. Muratov, K.R., and E.A. Gashev. “Methods of precision hole honing.” *Modern problems of science and education* 5 (2014): 288.

15. Soler, Ya.I., and Van Kan’ Nguen. “Assurance of tools form accuracy at plane grinding by Norton Vitrium wheel.” *Russian Engineering Research* 11 (2016): 51–58.

16. Gafarov, A.M., P.G. Suleymanov, and V.A. Gafarov. “Research of quality of parts surfaces, machined by rotating honing and operating in extreme conditions.” *Russian Engineering Research* 11 (2016): 63–68.

17. Gafarov, A.M., P.G. Suleimanov, and V.A. Gafarov. “Vliyanie tekhnologicheskikh parametrov na iznos poverkhnostnogo sloya detalei mashin, ekspluatiruemykh v ekstremal’nykh usloviyakh.” *Khimicheskoe i neftegazovoe mashinostroenie* 3 (2013): 46–48.

18. Gafarov, A.M., P.G. Suleimanov, F.M. Kalbiev, and V.A. Gafarov. “Issledovanie vliyaniya osnovnykh parametrov rotatsionnogo metoda obrabotki na kachestvo poverkhnosti detalei mashin, ekspluatiruemykh v ekstremal’nykh usloviyakh.” *Tekhnologiya mashinostroeniya* 4 (2017): 17–24.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Шарифов Захид Зиятхан —

доктор технических наук, профессор
Азербайджанская Государственная
Морская Академия
1005, Азербайджанская Республика,
г. Баку, ул. М.А. Расулзаде, 5
e-mail: scherifov.z@gmail.com,
zahid.sharifov@acsc.az

Алиев Чингиз Мансур —

кандидат технических наук, доцент
Азербайджанская Государственная
Морская Академия
1005, Азербайджанская Республика,
г. Баку, ул. М.А. Расулзаде, 5
e-mail: C.Aliyev@caspar.az, chingiz.aliyev@acsc.az

Кулиев Алимардан Мамедрза —

доцент
Азербайджанская Государственная
Морская Академия
1005, Азербайджанская Республика, г. Баку, ул.
М.А. Расулзаде, 5
e-mail: alimardan.quliyev@acsc.az

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Sharifov, Zahid Z. —

Dr. of Technical Sciences, professor
Azerbaijan State Marine Academy
5 M.A. Rasulzada Str., Baku, AZ1005,
Azerbaijan Republic
e-mail: scherifov.z@gmail.com,
zahid.sharifov@acsc.az

Aliyev, Chingiz M. —

PhD, associate professor
Azerbaijan State Marine Academy
5 M.A. Rasulzada Str., Baku, AZ1005,
Azerbaijan Republic
e-mail: C.Aliyev@caspar.az, chingiz.aliyev@acsc.az

Guliyev, Alimardan M. —

associate professor
Azerbaijan State Marine Academy
5 M.A. Rasulzada Str., Baku, AZ1005,
Azerbaijan Republic
e-mail: alimardan.quliyev@acsc.az

Статья поступила в редакцию 23 февраля 2017 г.

Received: February 23, 2017.

DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-6-1273-1281

STRENGTHENING OF STRUCTURAL ELEMENTS STICKER OF COMPOSITE MATERIALS AT COMPRESSED AND STRETCHED AREA

V. N. Gluhih, V. M. Petrov, E. V. Khudaev

Saint Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering,
St. Petersburg, Russian Federation

The paper discusses options for strengthening beams structures port structures made of wood sticker sheets from polymeric composite material (fiberglass and carbon fiber reinforced plastics epoxy matrix) with different modulus of elasticity. Strengthening of structures is composite materials for bonding sheets of a composite material with a thickness of 5 mm to the beam is made of wood with a cross-section with a height of 20 cm and a width of 40 cm in the stretched and compressed zone. The calculation of the gain is produced by conventional cast heterogeneous components of homogeneous cross-section. The problem is solved without taking into account pliability of joints seams and without matching adhesive composition. The study showed that the reinforcement of wooden beams with glass fabric with a low elastic modulus slightly increases the carrying capacity and increases the weight by 25.44 kg. in the amplification of a beam of composite material with modulus of elasticity equal to the modulus of elasticity of wood bearing capacity is increased 1,076 times and increases the weight of 1.25 times, compared with the composites having higher mechanical characteristics. In the case of the use of materials to enhance a modulus of elasticity higher than that of the material from which the beam increases the load carrying capacity of 1,997 times and the weight is 18 lbs. Of work performed it can be concluded that strengthening the construction of beams of composite materials significantly increases the carrying capacity with a slight increase in structural weight. Analyzes the main advantages of this method of amplification such as ease of amplification works, a slight increase of the beam section, etc. and also disadvantages such as sensitivity to small defects in the material, and the failure of the material in case of fire.

Keywords: structural element, beam, vegetable polymer, wood structures, composite materials, fiberglass, carbon fiber, detalny composite beams.

For citation:

Glüh, Vladimir N., Vladimir M. Petrov, and Egor V. Khudaev. "Strengthening of structural elements sticker of composite materials at compressed and stretched area." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admiral S. O. Makarova* 9.6 (2017): 1273–1281. DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-6-1273-1281.

УДК 69.059.3:691.175

УСИЛЕНИЕ ЭЛЕМЕНТОВ КОНСТРУКЦИЙ НАКЛЕЙКОЙ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ В СЖАТОЙ И РАСТЯНУТОЙ ЗОНЕ

В. Н. Глухих, В. М. Петров, Е. В. Худаев

ФГБОУ ВО «СПбГАСУ», Санкт-Петербург, Российская Федерация

В работе рассмотрены варианты усиления балок конструкций портовых сооружений, выполненных из дерева, наклейкой листов из полимерного композиционного материала (стеклопластики и углепластики на эпоксидной матрице) с различным модулем упругости. Усиление конструкций проводится композиционными материалами при приклеивании листов из композита толщиной 5 мм к балке, выполненной из дерева сечением высотой 20 см и шириной 40 см в растянутой и сжатой зоне. Расчет усиления выполняется методом условного приведения разномодульных составляющих сечения к однородной. Задача решена без учета податливости соединений швов и подбора клеевого состава. Исследование показало, что усиление деревянных балок стеклопластиком с низким модулем упругости незначительно увеличивает несущую способность и увеличивает массу на 25,44 кг. При усилении балки композиционным материалом с модулем упругости, равным модулю упругости древесины, несущая способность повышается в 1,076 раза и увеличивает массу 1,25 раза, по сравнению с композитом, обладающим более высокими механическими характеристиками. В случае применения материалов для усиления с модулем упругости выше, чем у ма-

териала, из которого выполнена балка, повышается несущая способность в 1,997 раза, а масса составляет 18 кг. Из выполненной работы можно сделать вывод о том, что усиление строительных балок композиционными материалами значительно увеличивает несущую способность при небольшом увеличении массы конструкции. Проанализированы основные преимущества данного метода усиления, такие как легкость производства усиления, незначительное увеличение сечения балки и др., а также такие недостатки, как чувствительность к мелким дефектам материала и отказ работы материала при пожаре.

Ключевые слова: элемент конструкции, балка, растительный полимер, деревянные конструкции, композиционные материалы, стеклопластик, углепластик, наклейка композита, расчет усиления балок.

Для цитирования:

Глухих В. Н. Усиление элементов конструкций наклейкой композиционных материалов в сжатой и растянутой зоне / В. Н. Глухих, В. М. Петров, Е. В. Худаев // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2017. — Т. 9. — № 6. — С. 1273–1281. DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-6-1273-1281.

Введение

Ускоренное освоение Северного морского пути, береговых территорий, а, следовательно, и Российского Севера в целом зависит на современном этапе, от создания достаточной портовой инфраструктуры. Поэтому качественно построенные промышленные и складские здания и сооружения с расширенным ресурсом и наименьшими затратами при их эксплуатации на сегодняшний день могут обеспечить достаточно эффективную работу портов для перевалки грузов, что, безусловно, является решением актуальной задачи при освоении севера. Кроме того, с учетом большого количества подобных зданий и сооружений в портовой инфраструктуре необходимо резко снизить потребление традиционно используемых конструкционных материалов для этой цели в строительных конструкциях в виде металлов и бетонов. Подчас строительство временных зданий и сооружений из железобетона или металла является не только экономически нецелесообразным, но и технически невозможным, поскольку оно связано с дополнительными транспортными затратами, сложными климатическими условиями для строительства капитальных зданий, а также отсутствием достаточной строительной инфраструктуры. Поэтому широкое применение находят разборные конструкции, выполненные на основе сэндвичей, где в качестве несущего каркаса используются элементы конструкций, выполненные из дерева, усиленные, в свою очередь, композиционными полимерными материалами в виде лент, нитей, тканевых структур и т. п. [1], [2]. Подобные композиционные материалы не только повышают физико-механические свойства конструкции в целом, но и выполняют протекторную защиту от внешних вредных факторов, в частности от повышенной влажности, избыточной солености и низких температур.

В процессе эксплуатации зданий и сооружений, в сложных условиях крайнего севера, при действии различных внешних факторов (осадки, низкие температуры, сейсмическая активность и т. д.) происходит обострение и проявление дефектов в материалах конструкций, возникает необходимость ремонта, восстановления и усиления элементов зданий и сооружений [3]. Особенно это касается материалов растительного происхождения, в первую очередь, древесины строительных пород, которые чувствительны к температурно-влажностным воздействиям [4], [5]. В случаях невозможности замены элементов конструкции на новые требуется ремонт, реставрация, восстановление и, как следствие, усиление старой конструкции при ее сохранении.

Применение современных композиционных полимерных материалов с наперед заданными свойствами делает такую техническую задачу практически решаемой с наименьшими экономическими затратами. Новые высокопрочные материалы — композиционные материалы — без ущерба для внешнего вида и габаритов конструкции значительно повышают срок ее службы и надежность [6] – [8].

Методы и материалы

Рассмотрим пример строительной балки из наиболее распространенного природного композиционного материала — древесины. Для повышения ее несущей способности используем ком-

позиционный полимерный материал с модулем упругости ниже, чем у древесины (например, лист из стеклопластика марки РСТ-250Л, который выпускается по ТУ 6-48-87-92 толщиной 5 мм, наклеиваемый в растянутой и сжатой зоне деревянной балки (рис. 1)).

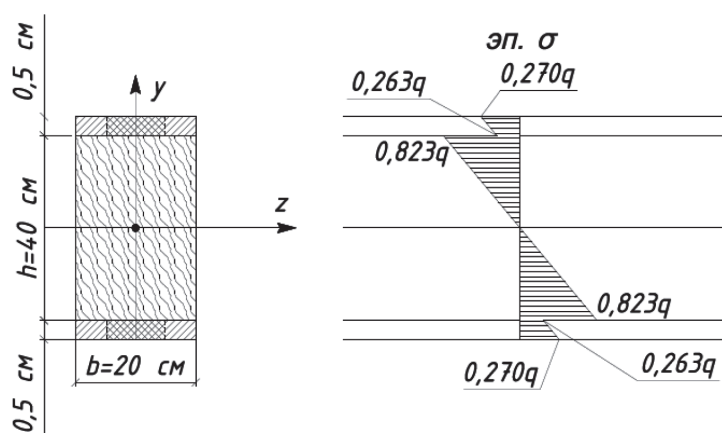


Рис. 1. Нормальные напряжения в балке, усиленной стеклопластиком, с модулем упругости меньше, чем у древесины

Балку, составленную из разнородных материалов, рассчитываем условно заменяя ее сечение «приведенным» сечением из одного материала, эквивалентным заданному. Из условия эквивалентности и на основании гипотезы плоских сечений следует равенство продольных относительных деформаций основного и «приведенного» сечений [8], [9]. При этом напряжение в составных частях балки будет зависеть от отношения модулей упругости материалов этих частей. Если, например, в деревянной полке, заменяющей стеклопластик, величина напряжений должна быть в 3,125 раза больше, чем в стеклопластике, то ширину полосы в «приведенном» сечении необходимо во столько же раз уменьшить (3,125 есть отношение модулей упругости древесины и стеклопластика) и наоборот, если дерево заменить стеклопластиком, то в «приведенном» сечении ширину следует принять в 3,125 раз большую.

Теоретическое решение задачи

Напряжение в сечении деревянной балки без усиления σ , МПа:

$$\sigma = \frac{M}{W} = \frac{6 \cdot 4,5 \cdot 10^3 \cdot q}{20 \cdot 40^2} = 0,843q.$$

Для расчета примем $b \times h = 20 \times 40$ см с приклеенными листами из стеклопластика толщиной $h_k = 0,5$ см в растянутой и сжатой зоне.

$$n = \frac{E_{\text{комп}}}{E_{\text{дер}}} = \frac{3200}{10000} = 0,32.$$

Приведенная площадь сечения

$$A_{\text{пр}} = A_{\text{дер}} + nA_{\text{ст}} = 800 + 2 \cdot 0,5 \cdot 0,32 \cdot 20 = 806,4 \text{ см}^2 = 0,0806 \text{ м}^2.$$

Сечение имеет две оси симметрии, на пересечении которых расположен его центр тяжести.

Момент инерции приведенного сечения

$$I_{z_0} = \frac{20 \cdot 40^3}{12} + 2n \left[I_z + y_j^2 \cdot A \right] = \frac{20 \cdot 40^3}{12} + 2 \cdot 0,32 \cdot \left[\frac{20 \cdot 0,5^3}{12} + 20,25^2 \cdot 20 \cdot 0,5 \right] = 109290 \text{ см}^2.$$

Расчетное значение изгибающего момента $M(x)$, кН·мм,

$$M(x) = \frac{ql^2}{8} = \frac{\text{кН}}{\text{м}} \cdot \frac{\text{м}^2}{8} = q \frac{(6 \cdot 10^3)^2}{8 \cdot 10^3} = 4,5 \cdot 10^3 q.$$

Напряжение в сечении части балки (рис. 1):

- при $y = 20,5 \text{ см}$ – $\sigma_{\text{комп}} = 0,270q \text{ МПа}$;
- при $y = 20 \text{ см}$ – $\sigma_{\text{комп}} = 0,263q \text{ МПа}$;
- при $y = 20 \text{ см}$ – $\sigma_{\text{дер}} = 0,270q \text{ МПа}$.

Если ординаты эпюры $\delta_{\text{дер}}$ умножить на коэффициент приведения $n = \delta_{\text{ст}} / \delta_{\text{дер}} = 0,32$, то получим соответствующие напряжения в материале усиления, т. е. $\sigma_{\text{max}}^{\text{ст}} = 0,32 \cdot 0,832q = 0,263q \text{ МПа}$. Масса усиливающей конструкции равна 25,44 кг, увеличение массы на погонный метр — 4,24 кг/м.

Отношение несущей способности балки усиленной стеклопластиком к балке без усиления (рис. 2):

$$\frac{0,843q}{0,823q} = 1,025.$$

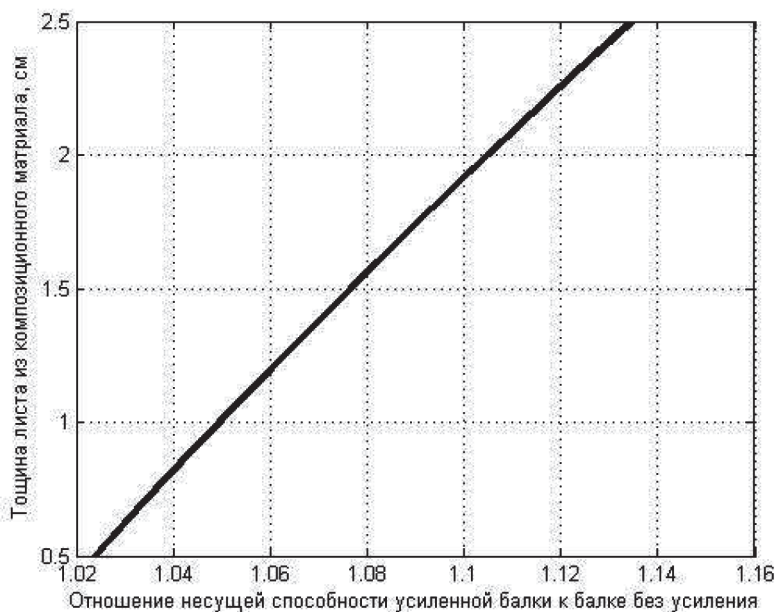


Рис. 2. Отношение несущей способности балки, усиленной композитным материалом с модулем упругости меньше, чем у древесины, к балке без усиления

Таким образом, вновь вводимая стеклопластиковая часть берет на себя меньше нагрузки.

Рассмотрим вариант усиления деревянной балки наклейкой листов из композиционных материалов с модулем упругости равным модулю упругости древесины (рис. 3).

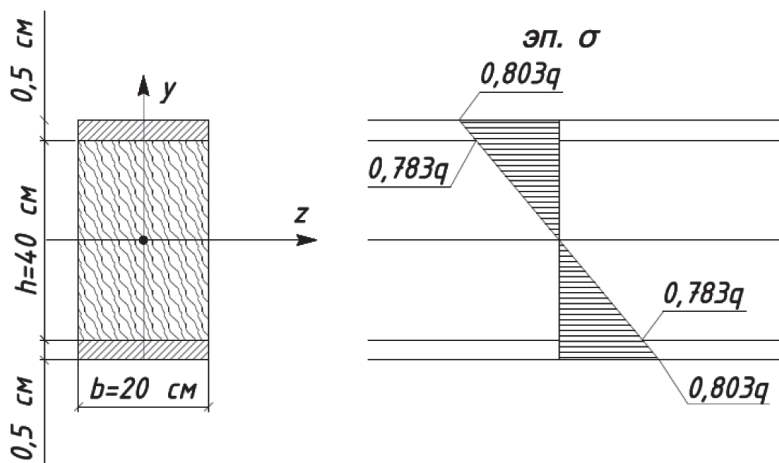


Рис. 3. Нормальные напряжения в балке, усиленной листами из композиционных материалов, с модулем упругости, равным модулю упругости древесины

$$n = \frac{E_{\text{комп}}}{E_{\text{дер}}} = 1;$$

$$I_{\text{пр}} = \frac{20 \cdot 40^3}{12} + 2 \cdot 1 \left(\frac{20 \cdot 0,5^3}{12} + 10 \cdot 20,25^2 \right) = 114870 \text{ см}^4 = 1,1487 \cdot 10^{-3} \text{ м}^4.$$

Напряжения в сечении балки (рис. 3):

$$-y = 20,5 \text{ см} - \sigma_{\text{комп}}^{\text{верх}} = 0,803q \text{ МПа};$$

$$-y = 20 \text{ см} - \sigma_{\text{комп}}^{\text{низ}} = 0,783q \text{ МПа};$$

$$-y = 20 \text{ см} - \sigma_{\text{дер}}^{\text{верх}} = 0,783q \text{ МПа}.$$

Отношение несущей способности балки, усиленной композиционным материалом с модулем упругости, равным модулю упругости древесины (рис. 4):

$$\frac{0,843q}{0,783q} = 1,076.$$

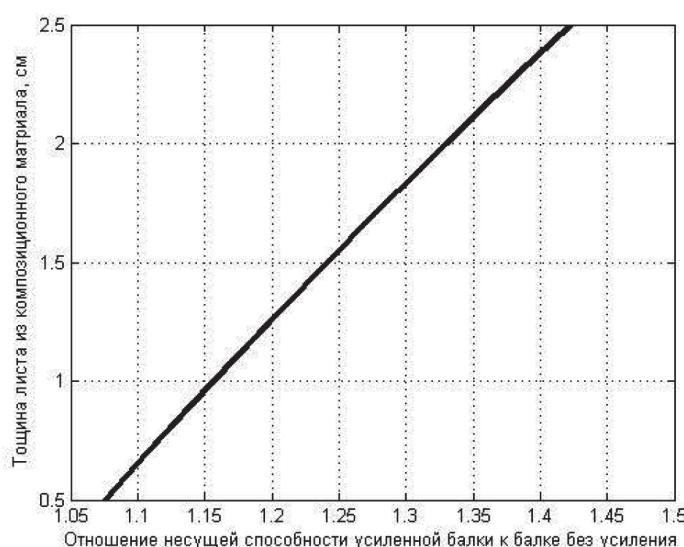


Рис. 4. Отношение несущей способности балки, усиленной композитным материалом с модулем упругости, равным модулю упругости древесины, к балке без усиления

Рассмотрим вариант усиления деревянной балки наклейкой листов из углепластика, например, с использованием углеткани марки ЗК, характер плетения твил 2/2 на эпоксидной матрице с температурой стеклования 80 °С и толщиной 5 мм и с модулем, превосходящим модуль упругости древесины (рис. 5).

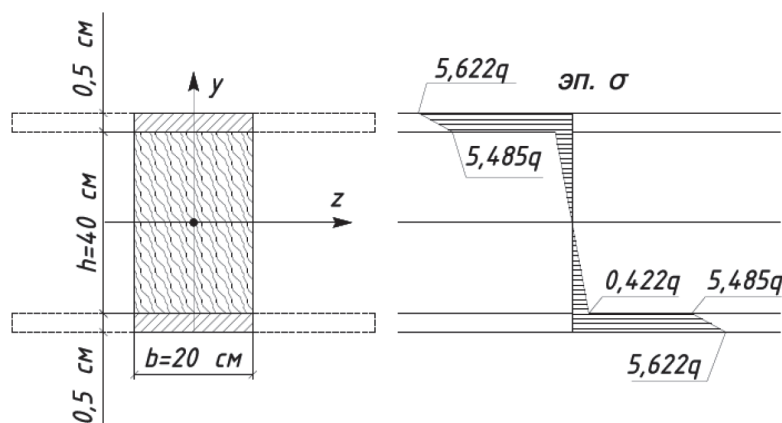


Рис. 5. Нормальные напряжения в балке, усиленной наклейкой листов из углепластика, с модулем упругости, превышающим модуль упругости древесины

$$n = \frac{E_{\text{комп}}}{E_{\text{дер}}} = 13;$$

$$I_{\text{пр}} = \frac{20 \cdot 40^3}{12} + 2 \cdot 13 \left(\frac{20 \cdot 0,5^3}{12} + 10 \cdot 20,25^2 \right) = 213288 \text{ см}^4 = 2,132 \cdot 10^{-3} \text{ м}^4.$$

Напряжения в сечении балки:

$$-y = 20,5 \text{ см} - \sigma_{\text{комп}}^{\text{верх}} = 5,622q \text{ МПа};$$

$$-y = 20 \text{ см} - \sigma_{\text{комп}}^{\text{низ}} = 5,485q \text{ МПа};$$

$$-y = 20 \text{ см} - \sigma_{\text{дер}}^{\text{верх}} = 0,422q \text{ МПа}.$$

Масса элементов усиления 18 кг. Увеличение массы на погонный метр составит 3 кг/м.

Необходимо учитывать, что усиление, препятствующее развитию разрушения от действия изгибающего момента, может повысить вероятность появления разрушения от действия поперечной силы и касательных напряжений [8] – [10]. Определим прочность клеевого шва при скалывании:

$$\tau_{\text{max}} = \frac{Q_y \cdot S_x^{\text{отс}}}{I_x \cdot b} = \frac{13 \cdot 0,5 \cdot 20 \cdot 20,25 \cdot Q_y}{2,132 \cdot 10^{-3} \cdot 0,2} = 6,17 \cdot 10^6 Q_y;$$

$$\tau_{\text{max}} \leq 35 \text{ МПа}.$$

Выполним сравнение грузоподъемности балки с усилением и без усиления углепластиком (рис. 6):

$$\frac{0,843q}{0,422q} = 1,997.$$

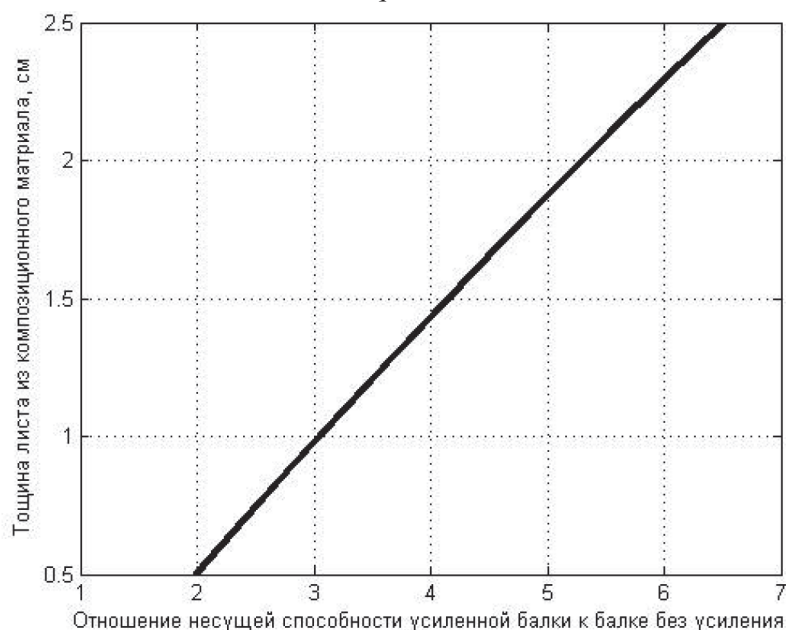


Рис. 6. Отношение несущей способности балки, усиленной композитным материалом, с модулем упругости большим, чем у древесины, к балке без усиления

Таким образом, подбирая материалы по величине модуля упругости, можно усилить строительную балку до требуемого уровня.

Обсуждение результатов

Полученные результаты исследования по повышению прочности балок или конструкций при восстановлении, ремонте либо реконструкции позволяют в необходимых случаях сохранить

строительную конструкцию при наименьших затратах. Применение высокопрочных композиционных материалов на основе волокон углерода, стекла, металлов делают эту задачу практически осуществимой.

Использование композиционных полимерных материалов на основе древесины, чувствительной к изменениям влажности среды, потребует протекторной защиты в виде влагоизоляции с целью предотвращения порчи и гниения, что, в конечном счете, приведет к увеличению срока службы конструкций. Для защиты погонажных изделий от окружающей среды можно при изготовлении защитить их поверхности способом намотки тканевых полос из композиционных материалов, армированных высокопрочными волокнами углерода, стекла и др.

Решенная задача выполнена без учета податливости соединений слоев из разнородных материалов. Податливость соединений (клеевых, на шурупах, с применением когтевых шайб, на гвоздях и т. д.) не отразится на основных выводах данного исследования.

Основными недостатками внешнего усиления строительных конструкций углепластиком являются возможные риски отказа от пожара, вандализма и случайных повреждений незащищенной конструкции. Поэтому при проектировании усиления необходимо учитывать, что наиболее благоприятным случаем эксплуатации конструкции после усиления будет восприятие усиливающим элементом из полимерного композиционного материала всей временной нагрузки (кратковременной и длительной), а постоянную нагрузку, особенно от собственного веса, будет воспринимать усиливаемая конструкция. Это положение играет важную роль при усилении мостовых конструкций. Композиционные материалы можно защитить как от вандализма, так и от пожара нанесением специальных покрытий.

Заключение

Таким образом, усиление строительных конструкций зданий портовой инфраструктуры композиционными материалами является менее трудоемким и энергозатратным процессом по сравнению со всеми другими аналогичными способами усиления (например, усиление металлическими конструктивными элементами). Это обстоятельство имеет немаловажное значение при ремонте и усилении многих конструкций, например, ангаров, навесов, корпусов промышленных зданий, цехов и прочей портовой инфраструктуры, когда их отказ (временное прекращение эксплуатации в ограниченные сроки навигации) во время проведения ремонтных работ приводит к значительным финансовым и материальным потерям.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Анисимов А. В.* Современные машиностроительные материалы. Неметаллические материалы: справ. / А. В. Анисимов, В. Е. Бахарева, И. В. Блышко [и др.]; под общ. ред. И. В. Горынина, А. С. Орыщенко. — СПб.: НПО «Профессионал», 2012. — 916 с.
2. *Kagan-Rosenzweig L.M.* On calculation of natural frequencies of compressed rods with variable cross-section / L.M. Kagan-Rosenzweig // *Materials Physics and Mechanics*. — 2017. — Т. 31. — № 1-2. — С. 12–15.
3. *Шилин А. А.* Усиление железобетонных конструкций композиционными материалами / А. А. Шилин, В. А. Пшеничный, Д. В. Кутузов. — М.: Стройиздат, 2004. — 144 с.
4. *Чернякин С. А.* Анализ роста расслоений в композитных конструкциях / С. А. Чернякин, Ю. В. Скворцов // *Вестник Сибирского государственного аэрокосмического университета им. академика М. Ф. Решетнева*. — 2014. — № 4 (56). — С. 249–255.
5. *Глухих В. Н.* Определение постоянных упругости с учетом анизотропии свойств композиционных материалов, используемых для намотки ответственных оболочек и стержневых конструкций в судостроении и портовой инфраструктуре / В. Н. Глухих, В. М. Петров, Н. Ю. Сойту // *Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова*. — 2016. — № 2 (36). — С. 137–142.

DOI: 10.21821/2309-5180-2016-8-2-137-142.

6. Rutman Yu. L. The generalization of the flexibility method for elastoplastic computation of rod systems / Yu. L. Rutman, V. A. Meleshko // *Materials Physics and Mechanics*. — 2017. — Т. 31. — № 1-2. — С. 67–70.

7. Акопян А. Л. К вопросу использования некоторых особенностей природных материалов при разработке композитов для строительных конструкций / А. Л. Акопян, В. Н. Глухих, А. А. Прилуцкий // *Фундаментальные исследования*. — 2016. — № 3-2. — С. 235–239.

8. Fornander M. A. New Method for using Prestressed Fiber-Reinforced Polymer Laminates for Strengthening and Repair of Structural Members: Master's Thesis / M. Fornander, P. Nihlmark. — Göteborg, Sweden: Chalmers University of Technology, 2013. — 159 p.

9. Островская Н.В. Использование структурных моделей для интерпретации феномена повышения прочности образцов при изгибе по сравнению с растяжением / Н.В. Островская, Ю.Л. Рутман, М.В. Меньшикова // *Морские интеллектуальные технологии*. — 2017. — Т. 1. — № 2 (36). — С. 81–86.

10. Каган-Розенцвейг Л. М. Техническая теория касательных напряжений в изгибаемом стержне / Л. М. Каган-Розенцвейг // *Вестник гражданских инженеров*. — 2017. — № 3 (62). — С. 40–49. DOI: 10.23968/1999-5571-2017-14-3-40-49.

REFERENCES

1. Anisimov, A.V., V.E. Bakhareva, I.V. Blyshko, et al. *Sovremennye mashinostroitel'nye materialy. Nemetallicheskie materialy: Sprav.* Edited by I.V. Gorynina, and A.S. Oryshchenko. SPb.: NPO «Professional», 2012.

2. Kagan-Rosenzweig, L.M. “On calculation of natural frequencies of compressed rods with variable cross-section.” *Materials Physics and Mechanics* 31.1-2 (2017): 12–15.

3. Shilin, A.A., V.A. Pshenichnyi, and D.V. Kutuzov. *Usilenie zhelezobetonnykh konstruksii kompozitsionnymi materialami*. M.: OAO Izdatel'stvo «Stroiizdat», 2004.

4. Chernyakin, Sergey Alekseevich, and Yuri Vasilyevich Skvortsov. “Analysis of delamination propagation in composite structures.” *Vestnik Sibirskogo gosudarstvennogo aerokosmicheskogo universiteta im. akademika M.F. Reshetneva* 4(56) (2014): 249–255.

5. Gluhikh, Vladimir Nikolaevich, Vladimir Markovich Petrov, and Natalja Jurevna Sojtu. “Determination of elasticity constants with anisotropy of properties of composite materials used for winding the responsible shell and beam structures in shipbuilding and port infrastructure.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova* 2(36) (2016): 137–142. DOI: 10.21821/2309-5180-2016-8-2-137-142.

6. Rutman, U.L., and V.A. Meleshko. “The generalization of the flexibility method for elastoplastic computation of rod systems.” *Materials Physics and Mechanics* 31.1-2 (2017): 67–70.

7. Akopyan, A.L., V.N. Glukhikh, and A.A. Prilutskiy. “The use of some natural materials in the development of composites for the building industry.” *Fundamental research* 3-2 (2016): 235–239.

8. Fornander, M., and P. Nihlmark. *A New Method for using Prestressed Fiber-Reinforced Polymer Laminates for Strengthening and Repair of Structural Members: Master's Thesis*. Göteborg, Sweden: Chalmers University of Technology, 2013.

9. Ostrovskaya, Nadejda Vladimirovna, Yuri Lazarevich Rutman, and Maria Valerjevna Menshikova. “Use of structural models for interpretation of the increase phenomenon in durability of samples at the bend in comparison with stretching.” *Marine intellectual technologies* 1.2(36) (2017): 81–86.

10. Kagan-Rosenzweig, L.M. “Technical theory of shearing stresses in a bent rod.” *Bulletin of Civil Engineers* 3(62) (2017): 40–49. DOI: 10.23968/1999-5571-2017-14-3-40-49.

Глухих Владимир Николаевич —
доктор технических наук, профессор
ФГБОУ ВО «СПбГАСУ»
190005, Российская Федерация,
г. Санкт-Петербург, ул. 2-я Красноармейская, 4
e-mail: tehmeh@spbgasu.ru

Петров Владимир Маркович —
доктор технических наук, профессор
ФГБОУ ВО «СПбГАСУ»
190005, Российская Федерация, г. Санкт-Петербург,
ул. 2-я Красноармейская, 4
e-mail: tribotex@yandex.ru
Худаев Егор Вадимович — ассистент
ФГБОУ ВО «СПбГАСУ»
190005, Российская Федерация, г. Санкт-Петербург,
ул. 2-я Красноармейская, 4
e-mail: Boturdar@mail.ru

Gluhih, Vladimir N. —
Dr. of Technical Sciences, professor
Saint-Petersburg State University
of Architecture and Civil Engineering
4 2nd Krasnoarmeyskaya Str., St. Petersburg,
190005, Russian Federation
e-mail: tehmeh@spbgasu.ru

Petrov, Vladimir M. —
Dr. of Technical Sciences, professor
Saint-Petersburg State University
of Architecture and Civil Engineering
4 2nd Krasnoarmeyskaya Str., St. Petersburg,
190005, Russian Federation
e-mail: tribotex@yandex.ru
Khudaev, Egor V. — Assistant
Saint-Petersburg State University
of Architecture and Civil Engineering
4 2nd Krasnoarmeyskaya Str., St. Petersburg,
190005, Russian Federation
e-mail: Boturdar@mail.ru

Статья поступила в редакцию 15 ноября 2017 г.

Received: November 15, 2017.

SIMULATION AND TESTING OF INDIVIDUAL ELEMENTS OF THE ASPIRATION SYSTEM AND VENTILATION USED DURING MECHANICAL TREATMENT OF COMPOSITE SHIPBUILDING MATERIALS

K. A. Vasilev

Saint-Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering,
St. Petersburg, Russian Federation

Polymer composite materials are beginning to be widely used in sudostroy research Institute responsible for the manufacture of large body parts, as well as de-hoists functional tribological purposes. Currently, there are the difficulty associated with solving environmental problems and tasks of environmental protection when machining composites, as well as problems related to health and safety in the workplace. Elevated carcinogenic properties of products of destruction of composites at cutting are determined by fine earthy dust with separate fractions of less than 10 MK, aerosols and mists of Metalworking fluids, harmful gases from disintegration under the influence of temperature organic matrix composite, etc. Previously listed require ventilation systems, aspiration products of destruction of composites and air-conditioning system of increased cost of separate modules, which will create the necessary climate and safe working conditions in the workplace. It is noted that substantially reduce the cost of stages of development of an integrated system of ventilation, perhaps through the use of the algorithm.- true taking into account not only the processes taking place in the area of mechanical processing, but also the capabilities of the individual modules, systems, and hardware control hazards involved in such complex systems. This article describes a comprehensive methodical approach to all stages, including the elaboration of individual modules of the system in both the design and during normal and abnormal operation. The proposed me-tadici and algorithms can be used to conduct scientific research related to the transition of existing production to the machining of workpieces made of composite materials. The results of the research confirm the efficiency of the proposed algorithm and the effectiveness of the used hardware.

Keywords: Composite material, ventilation, aspiration, air-conditioning, modeling, algorithm, process, measuring system, microscope, quality indicators.

For citation:

Vasilev, Kirill A. "Simulation and testing of individual elements of the aspiration system and ventilation used during mechanical treatment of composite shipbuilding materials." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admiral S. O. Makarova* 9.6 (2017): 1282–1290. DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-6-1282-1290.

УДК 629.12, 697.9

МОДЕЛИРОВАНИЕ И ИСПЫТАНИЕ ОТДЕЛЬНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ СИСТЕМЫ АСПИРАЦИИ И ВЕНТИЛЯЦИИ, ИСПОЛЬЗУЕМОЙ ПРИ МЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКЕ КОМПОЗИЦИОННЫХ СУДОСТРОИТЕЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ

К. А. Васильев

ФГБОУ ВО «СПбГАСУ», Санкт-Петербург, Российская Федерация

Полимерные композитные материалы начинают широко использоваться в судостроении для изготовления ответственных крупногабаритных корпусных деталей, а также деталей функционального триботехнического назначения. В настоящее время имеются трудности, связанные с решением экологических задач и задач охраны окружающей среды при механической обработке композитов, а также задач, связанных с охраной труда и техникой безопасности на рабочих местах. Повышенные канцерогенные свойства продуктов разрушения композитов при резании определяются мелкой перстной пылью с отдельными фракциями менее 10 мк, аэрозоли и туманы смазочно-охлаждающих жидкостей, вредные газы от распада под воздействием температуры органической матрицы композита и т. п. Ранее указанное требует от системы вентиляции, аспирации продуктов деструкции композитов, а также системы кондиционирования повышенных затрат

на отдельные модули, которые позволят создавать необходимый микроклимат и безопасные условия труда на рабочих местах. Отмечается, что существенно снизить затраты на этапах разработки комплексной системы вентиляции, возможно за счет использования алгоритма, достоверно учитывающего не только процессы, происходящие в зоне механической обработки, но и возможности отдельных модулей, систем и аппаратных средств контроля вредностей, задействованных в подобных комплексных системах. В статье изложен комплексный методический подход ко всем этапам, включающий проработку отдельных модулей системы как при проектировании, так и при штатной и нештатной эксплуатации. Предложенные методики и алгоритмы можно использовать для проведения научно-исследовательских работ, связанных с переходом действующего производства на механическую обработку заготовок из новых композиционных материалов. Приведенные результаты исследований подтверждают работоспособность предложенного алгоритма и эффективность использованных аппаратных средств.

Ключевые слова: композитный материал, вентиляция, аспирация, кондиционирование, моделирование, алгоритм процесса, измерительный комплекс, микроскоп, показатели качества.

Для цитирования:

Васильев К. А. Моделирование и испытание отдельных элементов системы аспирации и вентиляции, используемой при механической обработке композиционных судостроительных материалов / К. А. Васильев // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2017. — Т. 9. — № 6. — С. xx–xx. DOI:

Введение

В судостроении применяют достаточно большое количество инновационных композиционных полимерных материалов как для изготовления корпусных деталей, так и для деталей функционального назначения [1], [2]. Современные способы изготовления заготовок из полимерных композиционных материалов не всегда гарантируют точность и качество сопрягаемых поверхностей, обеспечивающих необходимые сопряжения в зазорах при монтаже и зазоры в парах трения. При изготовлении изделий из композиционных материалов в судостроительной области широко применяются разные типы технологического оборудования, связанного с формообразованием путем удаления слоя конструкционного материала [1]. К подобного рода методам механической обработки можно отнести технологические переделы, выполняемые на станках с повышенной концентрацией операций типа *обрабатывающий центр* с числовым программным управлением выполненные в виде стандартной компоновки (станка токарной или фрезерной группы) или станках портального типа для крупногабаритных заготовок; обрабатывающих модулей, оснащенных манипуляторами (роботами), а также обработку, проводимую на рабочих местах, в виде слесарных операций с помощью ручного пневматического и электроинструмента. Три последние из указанных технологических методов механической обработки и средств технологического оснащения имеют открытые зоны обработки с прямым контактом с окружающей средой.

Среди основных негативных и сдерживающих факторов, возникающих при обработке композиционных полимерных материалов, можно выделить [3]:

- отсутствие достаточной технологической базы в механической обработке, связанной со специфическими процессами, происходящими при разрушении резанием композиционных полимерных материалов, отсутствие законов, корректно описывающих деструкцию композита, а также принципов, рекомендаций по назначению режимов резания и единых правил;
- отсутствие единого подхода к использованию средств технического и технологического оснащения производства, частичное или полное отсутствие специализированного оборудования, инструмента и рекомендаций по обработке, а также отсутствие рекомендаций по выбору средств вентиляции, кондиционирования и аспирации (транспортировки) отходов производства и пылевидной стружки для рабочих мест;
- достаточно высокие требования, предъявляемые к качеству обработки композитных материалов, автоматически ужесточают самые высокие требования по точности оборудования и изготовления инструмента, что приводит к многократному удорожанию самих средств технологического оснащения;

– отсутствие единого выработанного подхода к безопасности условий труда, охраны окружающей среды, решения вопросов утилизации как самих изделий после исчерпания их ресурса, так и отходов производства (стружки и пыли).

Ранее сформулированные факторы, связанные с защитой окружающей среды и охраной труда определены Санитарными правилами для производства от 25 января 1989 г. № 4950-89. Наряду с факторами шума, вибрации и излишнего физического напряжения операторов наиболее существенным является фактор применения в качестве связующего полимерных эпоксидных или фенолформальдегидных смол, который обуславливает канцерогенную опасность указанных производств, что является основанием для предъявления повышенных требований к размещению предприятий, расположению отдельных цехов, к процессам и оборудованию. Если данные проблемы были достаточно хорошо решены в авиационной и аэрокосмической промышленности, то они полностью не были решены в судостроительной отрасли. Авиационная и космическая промышленность изначально строилась и проектировалась под новые композиционные материалы с учетом следующих нормативных требований:

– определение больших площадей, занимаемых предприятием, по сравнению с металлообработывающими производствами;

– строительство хорошо продуваемых отдельно стоящих корпусов с большими промежуточными расстояниями между отдельно стоящими зданиями, ориентированными к наиболее вероятной «розе ветров»;

– хорошая организация служб, обеспечивающих работоспособность системы вентиляции, кондиционирования, аспирации, утилизацию пыли и вредных выбросов от производства.

Следует отметить, что ранее указанные нормативные требования и средства их технического обеспечения полностью отсутствуют на современных судостроительных предприятиях (например, производствах судостроительного комплекса, расположенных в г. Санкт-Петербурге). Ныне действующие судостроительные предприятия исторически были адаптированы под традиционные конструкционные материалы, металлы и сплавы. На данных предприятиях механической обработки предъявлялись повышенные требования к безопасности труда и охране окружающей среды, как, например, изначально действующие требования в авиационной и аэрокосмической промышленности.

Методы и материалы

Для решения задач, связанных со снижением экологического давления производств, связанного с механической обработкой композитов, жестким выполнением требований нормативов по охране труда и технике безопасности, необходимо осуществить следующее:

1. Для проектируемой системы промышленной вентиляции, аспирации и системы кондиционирования воздуха:

– создать модели процесса — представить соответствующие математическое описание [4];
– провести анализ неопределенностей и формализация понятия цели (формирование целевой функции, критерия и т. п.);

– решить возникающие оптимизационные и сопутствующие математические задачи (добиться в течение минимального времени наибольшей производительности процесса при наименьшей износостойкости элементов трубопроводной системы вентиляции в режиме штатной эксплуатации и энергозатрат, а также обеспечить безопасность системы в случае аварийной ситуации (при резком увеличении удаляемого материала с заготовки и одновременно максимальных нагрузках в переходных зонах) — [3], [4].

– применить в качестве основных квазиоптимальные (рациональные) модели, позволяющие с удовлетворительной достоверностью описать процессы, протекающие в системе. Подход на основе квазиоптимальных (рациональных) моделей подразумевает построение многоуровневого алгоритма, позволяющего управлять сложной системой. Данный алгоритм состоит из восьми уровней (рис. 1) — [3], [4].



Рис. 1. Многоуровневая схема, иллюстрирующая алгоритм комплексный подход при выборе параметров системы вентиляции, аспирации, кондиционирования



Рис. 2. Классификационная схема аспирационных и пылетранспортных установок, применяемых в системах вентиляции при механической обработке композиционных материалов

2. Сформулировать требования к системе аспирации и пылеулавливания с учетом высокой канцерогенной и абразивной способности углеродосодержащей пыли, возникающей при обработке новых композиционных материалов, а также провести группировку аспирационных систем по переделам (получение исходных заготовок, механическая обработка, покраска и нанесение протекторных защитных покрытий и т. п.) вокруг вертикальных коллекторов, причем количество аспирируемых укрытий от оборудования одинакового назначения не должно превышать пяти [5]. Подобная компоновка участка, состоящего из четырех токарных обрабатывающих центров модели, приведена в работе [4]. Оптимальное разрежение в рабочей зоне аспирируемых укрытий должно находиться в пределах 10 ... 30 Па, возможная компоновка рабочего места для одной единицы оборудования представлена в работах [3], [4].

Из представленного на рис. 2 классификатора следует предварительно выбрать тип пневмотранспортной установки, обеспечивающей необходимое пылеудаление из зоны обработки, а также транспортировку частиц пыли и продуктов разрушения композиционных материалов в виде струйки до места фильтрации и хранения твердых частиц [6], [7].

3. На этапе проектирования системы вентиляции, аспирации и кондиционирования целесообразно широко использовать аппаратные средства, автоматизированные измерительные комплексы, приборы и прочие средства оценки показателей, которые при таком комплексном подходе позволяют комплексно оценить состояние отдельных узлов и всей системы вентиляции в целом.

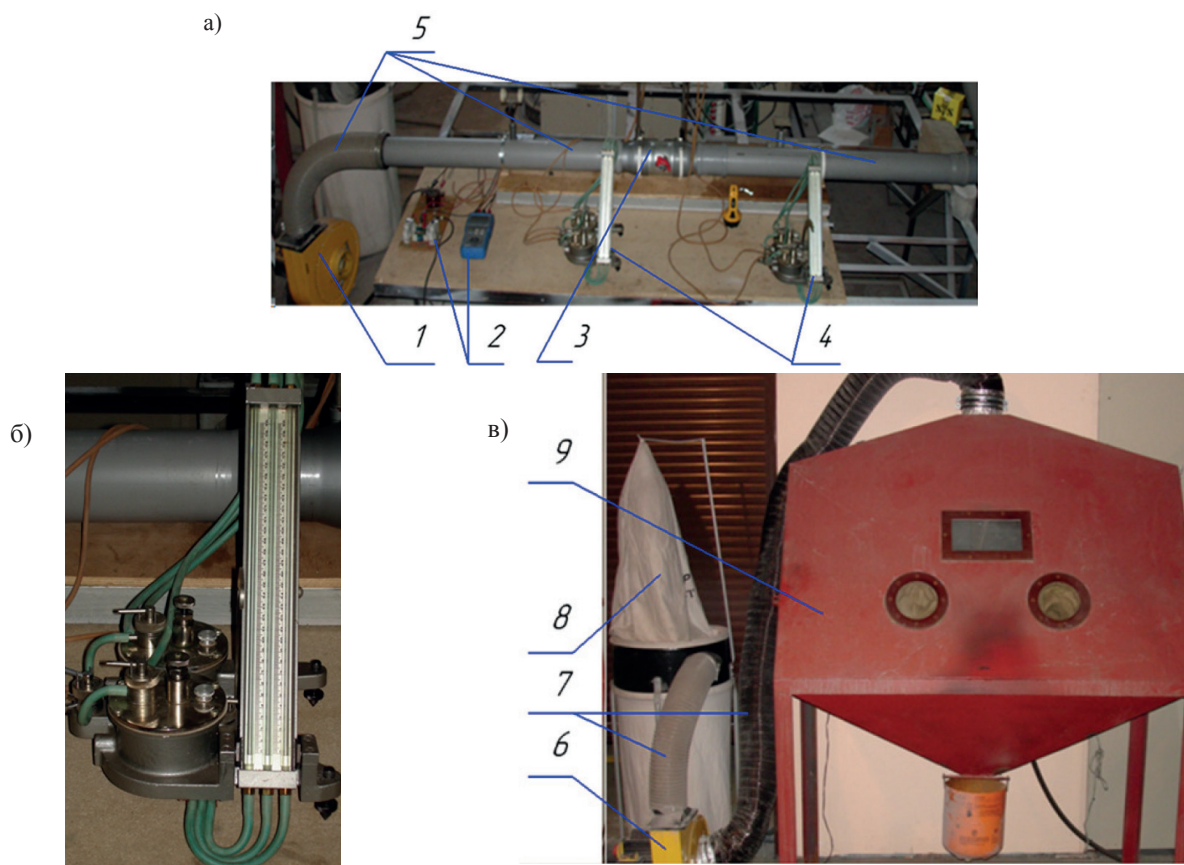


Рис. 3. Фотография стенда для моделирования процессов, протекающих в системе вентиляции и аспирации:

- а — общая компоновка: 1 — улитка вентилятора; 2 — ваттметр РХ 120; 3 — цилиндрическая заслонка; 4 — дифференциальный строенный микроманометр; 5 — трубопроводы;
 б — дифференциальный строенный микроманометр ТТ 1 ПС;
 в — модуль для моделирования экстремальных условий в зоне механической обработки;
 9 — пескоструйная камера объемом 1,5 м³; 6 — улитка промышленного пылесоса;
 7 — трубопроводы; 8 — мешок фильтра тонкой очистки

Подобные аппаратные измерительные средства позволяют:

– выполнить стендовые аэродинамические испытания отдельных элементов конструкции системы вентиляции, элементов трубопроводов, систем задвижки, работы фильтров, циклона, а также оценить вольтамперные характеристики, мощность двигателя вентилятора с помощью ваттметра PX 120, а также измерить составляющие давления (полного, статического и динамического как всасывающем, так и в нагнетательном режимах.) внешним строенным дифференциальным микроманометром марки ТТ I ПС. Компоновка и отдельные элементы испытательного стенда представлены на рис. 3;

– осуществить инструментальную оценку, визуальным способом частиц пыли, элементов стружки, состояние фильтрующего элемента и прочих вредностей, а также способом сканирования алмазной иглой оценить эксплуатационные показатели качества (микрогеометрии и шероховатости), состояния поверхностей трубопроводов и элементов системы аспирации и транспортирования. Данные по измерительно-вычислительным комплексам визуального мониторинга на базе микроскопа МБС-10 и комплекса оценки микрогеометрии поверхности на базе «Калибр-201» представлены в работах [8].

Обсуждение результатов

В рамках проводимых исследований были испытаны на стенде различные образцы пыли конструкционных материалов [9], [10]: углепластик марки УГЭТ, стеклотекстолит СТЭФ ГОСТ 12652-74, текстолит ПТК ГОСТ 5-78. Была проведена оценка мощности привода вентилятора улитки и фильтрующая способность предоставленных заказчиком образцы фильтрующей ткани различного класса фильтрующей способности G1, G3, F5. Фильтр устанавливался после заслонки, и методика испытаний осуществлялась согласно стандартам ЕН 1822-1:1998, ИСО 2854: 1976, ИСО 12103-1:1997.

Пример результирующего протокола по оценке мощности привода улитки вентилятора представлен на рис. 4. Значение мощности в реальном масштабе времени измерялось с помощью ваттметра PX – 120 и передавалось на компьютер, который регистрировал данные и строил зависимость мощности от времени в виде графика в автоматическом режиме с помощью программного продукта Watt Com. Затем все данные экспортировались в Microsoft Exel и с помощью специально написанного скрипта обсчитывались, что значительно облегчало работу с большими массивами данных.

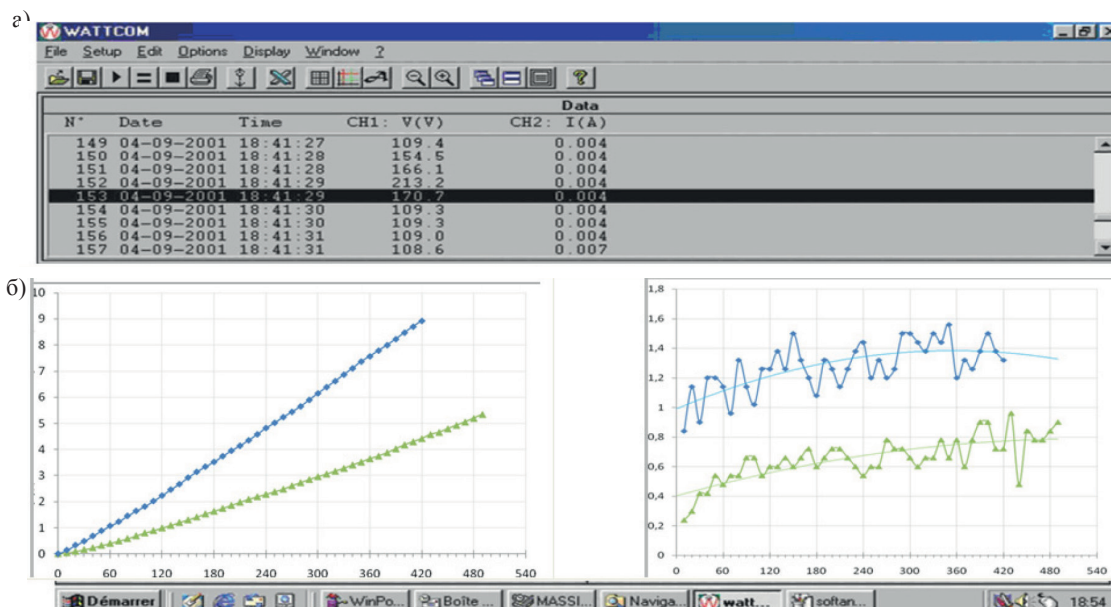
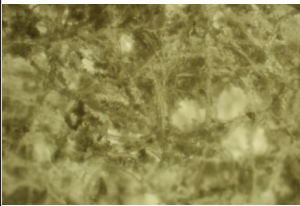
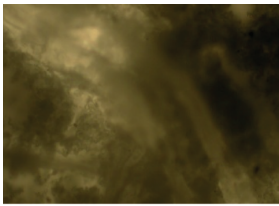
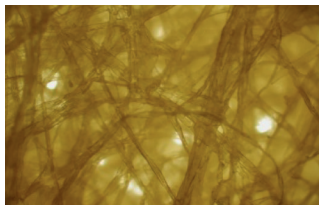
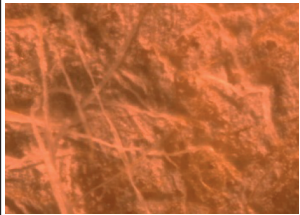
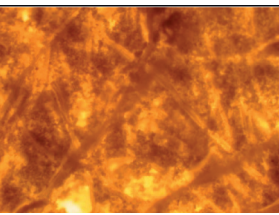
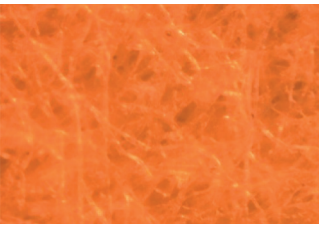
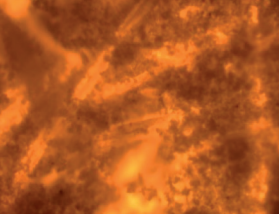
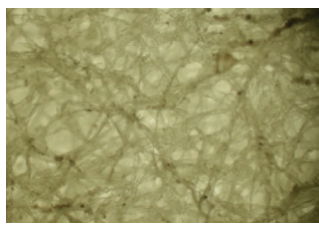


Рис. 4. Пример протокола с использованием программы Watt Com: а — изменение скорости вращения вала электродвигателя жестко связанного с улиткой вентилятора в зависимости от размеров частиц пыли композиционного материала в трубопроводе; б — верхний график — транспортировка пыли углепластика марки УГЭТ, нижний график — транспортировка пыли стеклотекстолита марки СТЭФ ГОСТ 12652-74 — стеклотекстолит электротехнический листовой

Отдельные результаты визуального мониторинга с использованием измерительно-вычислительного комплекса на базе МБС-10 приведены в таблице.

Фрагменты стружки и промышленной пыли после механической обработки резанием разных марок полимерных композиционных материалов, осаженных на образцах фильтрующих элементов, в зависимости от используемой ткани в образцах фильтров

№ п/п.	Марка и наименование композитного полимерного материала	Микрофотографии образцов тканевого фильтра после пропитки их мелкодисперсными фрагментами пыли различных композиционных материалов (фракции 0,1 – 10 мкм), увеличение x100		Микрофотографии образцов фильтра тканевого материала, увеличение x100
		Класс F5	Класс G1	
1	Углепластик марки УГЭТ			Класс G1 $50 \leq A_m < 65^*$
				
2	Текстолит ПТК ГОСТ 5-78			Класс G3 $80 \leq A_m < 90^*$
				
3	Стеклотекстолит СТЭФ ГОСТ 12652-74			Класс F5 $40 \leq E_m < 60^{**}$
				

Примечания: * — средняя пылезадерживающая способность A_m по синтетической пыли (указана в процентах); ** — средняя эффективность E_m для частиц с размерами 0,4 мкм (указана в процентах).

Анализ экспериментальных данных осуществляется на основании оценки результатов параллельных испытаний, которые являются случайными величинами. Значения колеблются вокруг истинного значения измеряемого параметра, поэтому для оценки результатов испытаний использовались методы обработки данных. В первую очередь, все максимальные и минимальные результаты были оценены на выбросы (грубые ошибки) с помощью критерия Романовского. Далее проводился стандартный расчет. Точность и надёжность оценки результатов экспериментов определялась величиной доверительной вероятности b или уровнем значимости $\alpha = 1 - b$. При данных испытаниях использовались $b = 0,95$ или $\alpha = 0,05$.

Проведенные собственные эксперименты на данном стенде (см. рис. 3) показали работоспособность предложенного алгоритма, в частности возможность оценки как функциональных по-

казателей, отвечающих за эффективность процесса вентиляции и аспирации частиц пыли, так и показателей качества изготовления отдельно выполненных деталей и узлов в целом.

Модульный принцип построения стенда показал его универсальность с точки зрения решаемых задач, ограниченных не только потребностями отдельно расположенных единиц технологического оборудования (например, токарных или фрезерных станков с числовым программным управлением), но и возможностями моделирования отдельных ситуаций на рабочих местах с открытой рабочей зоной, где используется ручной и автоматизированный механический инструмент: пневматический и электрический.

Предложенные методики оценки рабочей эффективности стенда могут в дальнейшем быть использованы для расчета экономической эффективности принимаемых тех или иных технических решений, конкретных конструкторских реализаций и апробации новых конструкционных материалов и материалов, используемых в фильтрующих элементах и пневмотранспортных системах.

Выводы

1. Полимерные композиционные материалы, используемые в судостроительной отрасли, могут получить широкое применение, если полностью будут решены вопросы, связанные с экологической безопасностью и охраной окружающей среды, а также безопасностью на рабочих местах при механической обработке.

2. Разработанный комплексный подход и отдельные алгоритмы по методикам испытаний системы вентиляции и аспирации, изложенные в данной статье, позволяют с необходимой полнотой и достаточной достоверностью обеспечить необходимую техническую и экологическую безопасность и исключить вредные выбросы в цеховую зону.

3. Предложенный модульный принцип построения стенда и достаточная оснащенность испытаний аппаратными и инструментальными средствами позволят получить наилучший результат при наименьших материальных затратах, связанных, в первую очередь, с количеством необходимых реализаций и опытов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Анисимов А. В.* Современные машиностроительные материалы. Неметаллические материалы: справ. / А. В. Анисимов, В. Е. Бахарева, И. В. Блышко [и др.]; под общ. ред. И. В. Горынина, А. С. Орыщенко. — СПб.: НПО «Профессионал», 2012. — 916 с.

2. *Fornander M.* A New Method for using Prestressed Fiber-Reinforced Polymer Laminates for Strengthening and Repair of Structural Members: Master's Thesis / M. Fornander, P. Nihlmark. — Göteborg, Sweden: Chalmers University of Technology, 2013. — 159 p.

3. *Васильев К. А.* Общие подходы при моделировании сложных процессов происходящих в системах промышленной вентиляции и пневмотранспортных системах / К. А. Васильев, Т. А. Дацюк, В. М. Петров // Морское образование: традиции, реалии и перспективы: материалы науч.-практ. конф. — 2015. — С. 25–30.

4. *Васильев К. А.* Моделирование системы кондиционирования воздуха на участках механической обработки композиционных материалов судостроительного производства / К. А. Васильев // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2016. — № 6 (40). — С. 129–139. DOI: 10.21821/2309-5180-2016-8-6-129-139.

5. *Гримитлин А. М.* Воздухообмен в цехах судостроительных заводов / А. М. Гримитлин, Г. М. Позин // Сантехника, отопление, кондиционирование. — 2014. — № 1 (145). — С. 106–108.

6. Пат. 2569245 Российская Федерация, МПК F24F 5/00. Рециркуляционный агрегат для производственных помещений / В. Е. Воскресенский, А. М. Гримитлин, Д. А. Захаров (заяв. и патентообл.). — № 2014149538/12; заявл. 08.12.2014; опубл. 20.11.2015, Бюл. № 32.

7. *Гримитлин А. М.* Вентиляция и отопление судостроительных производств / А. М. Гримитлин, Г. М. Позин // Инженерно-строительный журнал. — 2013. — 6 (41). — С. 7–11.

8. *Петров В. М.* Исследование влияния лазерной упрочняющей технологии поверхности образцов из титанового сплава на работоспособность пары трения скольжения углепластик - титан / В. М. Петров,

А. А. Буцанец, С. Н. Безпальчук // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2016. — № 6 (40). — С. 120–129. DOI: 10.21821/2309-5180-2016-8-6-120-129.

9. Васильев К. А. Повышение эффективности работы системы местной вентиляции при механической обработке композиционных полимерных материалов, применяемых в современном судостроении / К. А. Васильев // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2014. — № 5 (27). — С. 64–74. DOI: 10.21821/2309-5180-2014-6-5-64-74.

10. Vasiliev V. V. Anisogrid composite lattice structures – Development and aerospace applications / V. V. Vasiliev, V. A. Barynin, A. F. Razin // Composite Structures. — 2012. — Vol. 94. — Is. 3. — Pp. 1117–1127. DOI: 10.1016/j.compstruct.2011.10.023.

REFERENCES

1. Anisimov, A. V., V. E. Bahareva, I. V. Blyshko, et al. *Sovremennye mashinostroitelnye materialy. Nemetallicheskie materialy: sprav.* Edited by I. V. Gorynin, A. S. Oryshhenko. SPb.: NPO «Professinal», 2012.

2. Fornander, M., and P. Nihlmark. A New Method for using Prestressed Fiber-Reinforced Polymer Laminates for Strengthening and Repair of Structural Members: Master's Thesis. Göteborg, Sweden: Chalmers University of Technology, 2013.

3. Vasil'ev, K. A., T. A. Datsyuk, and V. M. Petrov. "Obshchie podkhody pri modelirovanii slozhnykh protsessov proiskhodyashchikh v sistemakh promyshlennoi ventilyatsii i pnevмотransпортных системах." *Morskoe obrazovanie: traditsii, realii i perspektivy: materialy nauchno-prakticheskoi konferentsii.* 2015: 25–30.

4. Vasilev, Kirill Aleksandrovich. "Simulation of air conditioning system in areas of machining of composite materials shipbuilding production." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 6(40) (2016): 129–139. DOI: 10.21821/2309-5180-2016-8-6-129-139.

5. Grititlin, A. M., and G. M. Pozin. "Vozdukhoozmen v tsekhakh sudostroitel'nykh zavodov." *Santekhnika, otoplenie, konditsionirovanie* 1(145) (2014): 106–108.

6. Voskresenskii, V. E., A. M. Grititlin, and D. A. Zakharov. RU 2 569 245 C1, IPC F 24 F 5/00. Retsirkulyatsionnyi agregat dlya proizvodstvennykh pomeshchenii. Russian Federation, assignee. Publ. 20 Nov. 2015.

7. Grititlin, A. M., and G. M. Pozin. "Air exchange management in shipyard shops." *Magazine of Civil Engineering* 6(41) (2013): 7–11.

8. Petrov, Vladimir Markovich, Artem Aleksandrovich Butsanets, and Sergej Nikolaevich Bezpal'chuk. "Influence of laser hardening technology of surface of samples of titanium alloy on the performance of friction pairs carbon fiber - titanium." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 6(40) (2016): 120–129. DOI: 10.21821/2309-5180-2016-8-6-120-129.

9. Vasilev, K. A. "Improve the effectiveness of the system of local ventilation during mechanical processing of polymer materials used in modern shipbuilding." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 5(27) (2014): 64–74. DOI: 10.21821/2309-5180-2014-6-5-64-74.

10. Vasiliev, Valery V., Vyacheslav A. Barynin, and Alexander F. Razin. "Anisogrid composite lattice structures—Development and aerospace applications." *Composite structures* 94.3 (2012): 1117–1127.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Васильев Кирилл Александрович — аспирант
Научный руководитель:
Дацюк Тамара Александровна —
доктор технических наук, профессор.
ФГБОУ ВО «СПбГАСУ»
190005, Российская Федерация, г. Санкт-Петербург,
ул. 2-я Красноармейская, 4
e-mail: kirrrrrill@mail.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Vasilev, Kirill A. — Postgraduate
Supervisor:
Datsjuk Tamara Aleksandrovna —
Dr. of Technical Sciences, professor
Saint-Petersburg State University of Architecture and
Civil Engineering
4 2nd Krasnoarmeyskaya Str., St. Petersburg, 190005,
Russian Federation
e-mail: kirrrrrill@mail.ru

Статья поступила в редакцию 15 ноября 2017 г.
Received: November 15, 2017.

СУДОВЫЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ УСТАНОВКИ, СИСТЕМЫ И УСТРОЙСТВА

DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-6-1291-1299

APPLICATION OF ADJUSTABLE TURBOCHARGING FOR OPTIMIZATION OF WORKING PROCESSES OF MAIN SHIPS ENGINES DURING THE LONG-TERM OPERATION AT THE SMALL POWER MODES

A. S. Punda, Y. G. Gurev

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

The article considers possible methods for solving the problems arising during long-term operation of main ships engines in slow steaming modes, which necessity caused by the requirements of the new edition of Annex VI to the MARPOL 73/78 international convention for improving the vessel's energy efficiency and reducing carbon dioxide emissions. With a decrease the speed of the vessel to 0.7 of full, the power of the main engine is reduced to 35% of the nominal. Long-term operation at this power leads to a decrease service life of mane engine. Studies show that an effective means of ensuring an optimal working process in a wide range of engine conditions is an adjustable turbocharging. It can be done either by installing a turbocharger with an adjustable cross-section of the turbine nozzle apparatus, or by using a register-type supercharging system. The efficiency of application of turbocharging with adjustable nozzle device, which allows to provide the optimum excess air ratio in a wide range of operating modes of the engine, is analyzed in the article. As a result, in the power range of 25 – 75 %, a reduced specific effective fuel consumption is provided, carbon dioxide and hydrocarbon compounds are reduced.

The effectiveness of the application of the methods for optimizing the operation of engines considered in the article is analyzed. Analyzed of the data obtained from the results of numerical simulation using turbocharging with an adjustable cross-section of the turbine nozzle apparatus (Variable Turbine Area). Also, a comparative analysis of the parameters of bench tests and performance of the engine with the use of a turbocharger cut out system was performed. Conclusions are made about the efficiency of using, the considered methods of optimizing the main engine's working processes during long-term operation at slow steaming modes.

Keywords: energy efficiency, exhaust emission, main ships engine, turbocharging, slow steaming mode.

For citation:

Punda, Aleksandr S., and Yurii G. Gur'ev. "Application of adjustable turbocharging for optimization of working processes of main ships engines during the long-term operation at the small power modes." *Vest-nik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova* 9.6 (2017): 1291–1299. DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-6-1291-1299.

УДК 621.436

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ РЕГУЛИРУЕМОГО ТУРБОНАДДУВА ДЛЯ ОПТИМИЗАЦИИ РАБОЧИХ ПРОЦЕССОВ ГЛАВНЫХ СУДОВЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ ПРИ ДЛИТЕЛЬНОЙ РАБОТЕ НА МАЛЫХ МОЩНОСТЯХ

А. С. Пунда, Ю. Г. Гурьев

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

В статье рассматриваются возможные методы решения проблем, возникающих при длительной эксплуатации главных судовых двигателей на режимах малых мощностей, необходимость которой

вызвана выполнением требований новой редакции Прил. VI Международной конвенции МАРПОЛ 73/78 по повышению энергоэффективности судна и снижению выбросов углекислого газа. При снижении скорости хода судна до 0,7 от полной мощность главного двигателя снижается до 35 % от номинальной. Длительная работа на такой мощности приводит к снижению моторесурса двигателя. Исследования показывают, что эффективным средством обеспечения оптимального рабочего процесса в широком диапазоне режимов двигателя является регулируемый турбонаддув. Его можно осуществить либо установкой турбокомпрессора с регулируемым проходным сечением соплового аппарата турбины, либо использованием регистровой системы наддува. В статье проанализирована эффективность применения турбонаддува с регулируемым сопловым аппаратом, который позволяет обеспечивать оптимальный коэффициент избытка воздуха в широком диапазоне рабочих режимов двигателя. В результате в диапазоне мощностей 25 – 75 % обеспечивается пониженный удельный эффективный расход топлива, снижаются выбросы углекислого газа и углеводородных соединений. Авторами статьи проанализированы результаты численного моделирования рабочего процесса главного двигателя при использовании наддува с регулируемым проходным сечением соплового аппарата турбины, выполнен сравнительный анализ параметров, взятых со стендовых испытаний и эксплуатационных показателей двигателя при использовании регистровой системы наддува. В заключительной части статьи сделаны выводы об эффективности использования рассмотренных методов оптимизации рабочих процессов главного двигателя при длительной работе на режимах малых мощностей. Использование регулируемого турбонаддува позволяет существенно улучшить работу двигателя на режимах малых мощностей. Параметры рабочих процессов восстанавливаются практически до значений, соответствующих режиму эксплуатационного полного хода.

Ключевые слова: энергоэффективность, выхлопные газы, главный судовый двигатель, турбонаддув, режимы малого хода.

Для цитирования:

Пунда А. С. Использование регулируемого турбонаддува для оптимизации рабочих процессов главных судовых двигателей при длительной работе на малых мощностях / А. С. Пунда, Ю. Г. Гурьев // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2017. — Т. 9. — № 6. — С. 1291–1299. DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-6-1291-1299.

Введение (Introduction)

Ограничение выброса CO₂ в соответствии с новой редакцией Прил. VI Международной конвенции МАРПОЛ 73/78 [1] будет решаться на стадии проектирования и постройки новых судов путем обеспечения требуемого уровня конструктивного коэффициента энергоэффективности EEDI [2].

Предусматривается введение нормативов по эксплуатационному индикатору энергоэффективности судна — EEOI (предположительно после 2020 г.), что служит рыночной мерой по ограничению выброса CO₂ [3] – [5] в эксплуатации и, по-видимому, целиком будет являться сферой ответственности судоходных компаний. Для разработки нормативов по ограничению уровня EEOI в Комитете по защите морской среды ИМО в 2015 г. была сформирована рабочая группа.

В публикациях [6] – [8] было показано, что при снижении эксплуатационной скорости хода судна до оптимальной по удельному путевому расходу повышается энергоэффективность судна (эксплуатационный индикатор энергоэффективности EEOI уменьшается на 35 – 40 %). Кроме того, на эту же величину снижается выброс оксидов азота и серы, приходящийся на тонна-милю транспортной работы судна. Повышение эксплуатационной энергоэффективности судна за счет снижения скорости хода судна при высокой стоимости топлива обеспечивает также максимум годовой прибыли судна. Подавляющее большинство морских транспортных судов оборудовано одним главным малооборотным двигателем с изобарным наддувом. При снижении скорости хода судна до 0,7 от полной мощность главного двигателя снижается до 35 % от номинала. Длительная работа на такой мощности приводит, как показано в работе [9], к снижению моторесурса двигателя. Как показано на рис. 1, оптимальная скорость судна по максимуму ресурса составляет 0,8 (соответствует 51 % мощности), а по путевому расходу — около 0,7.

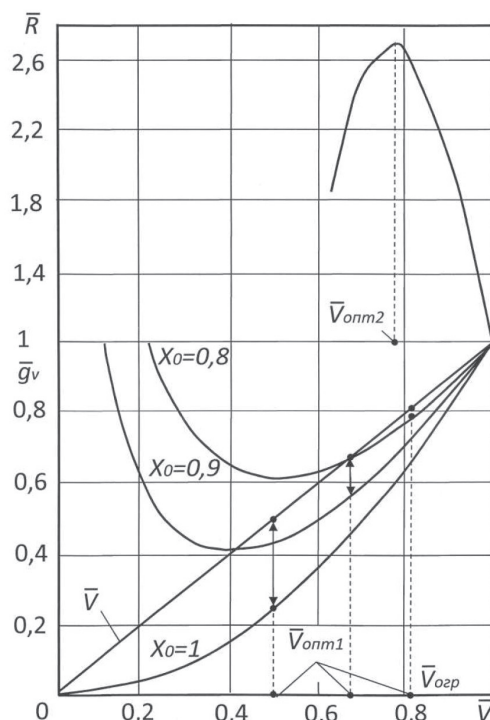


Рис. 1. Зависимость относительного путевого расхода топлива и относительного ресурса от изменения скорости

Анализ эксплуатационных данных показывает, что суда морского флота в массовом порядке эксплуатируются на скоростях даже ниже 70 %, при этом двигатели длительно работают на мощностях менее 35 %. При этом большинство из них имеет двигатели с механическим приводом ТНВД и гидромеханическим приводом выпускных клапанов. Для таких двигателей осуществить оптимальную настройку фаз топливоподачи, газораспределения и регулирование турбокомпрессора при работе на эксплуатационных режимах минимальной мощности затруднительно. Кроме того, не все регулировки дизеля могут производиться без согласования с заводом-изготовителем и классификационным обществом, выдавшим международное свидетельство по выбросам оксидов азота.

Методы и материалы (Methods and Materials)

Исследования показали, что эффективным средством обеспечения оптимального рабочего процесса в широком диапазоне режимов двигателя является регулируемый турбонаддув, который можно осуществить либо установкой турбокомпрессора с регулируемым проходным сечением соплового аппарата турбины, либо использованием регистровой системы наддува. Оба варианта могут быть реализованы в двигателях с электронным управлением, например, на малооборотных двигателях фирмы «МАН Дизель и Турбо» серии ME [10].

Регулирование проходного сечения турбины [11] (VTA — Variable Turbine Area) выполняется путем установки соплового аппарата с поворотными лопатками на любой из производимых серийно турбокомпрессоров (ТК). Управление производится гидравлическими приводами (рис. 2).



Рис. 2. Турбокомпрессор серии TCA с регулируемым сопловым аппаратом турбины

Сопловой аппарат регулируется таким образом, чтобы в широком диапазоне рабочих режимов двигателя обеспечивался оптимальный коэффициент избытка воздуха. В результате в диапазоне мощностей 25 – 75 % обеспечивается пониженный удельный эффективный расход топлива (рис. 3), снижаются выбросы углекислого газа и углеводородных соединений.

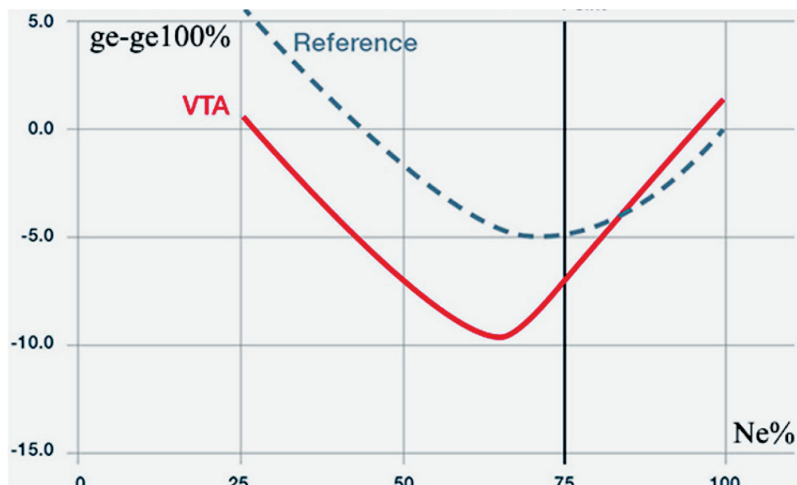


Рис. 3. Снижение удельного эффективного расхода топлива (g_e) двигателей фирмы «MAN Diesel and Turbo» серии ME при использовании системы VTA относительно исходной кривой (Reference)

Более простой вариант оптимизации — регистровая система наддува [12] (TC Cut-Out system) — может быть реализован на дизелях (в том числе находящихся в эксплуатации) при наличии двух-трех ТК. Суть метода заключается в том, что при снижении мощности двигателя поочередно отключают ТК. Это можно выполнить вручную, путем установки заглушек на входе газа в турбину и выходе воздуха из компрессора. Метод является трудоемким, поэтому применяется при длительном использовании режимов малых мощностей. Переналадка системы наддува требует остановки двигателя. Как и при аварийном отключении, ротор ТК может находиться в корпусе не более 3000 ч работы при смазке подшипников и подаче воздуха на уплотнения.

В двигателях с электронным управлением фирмы «MAN Diesel and Turbo» серии ME используется регистровый наддув. Включение / выключение ТК осуществляется автоматически с помощью пневмоуправляемых заслонок. Схема системы с двумя ТК показана на рис. 4. Переход на работу с одним ТК осуществляется при снижении мощности двигателя менее 50 % от номинала. Конструкция поворотного затвора и его установка показаны на рис. 5.

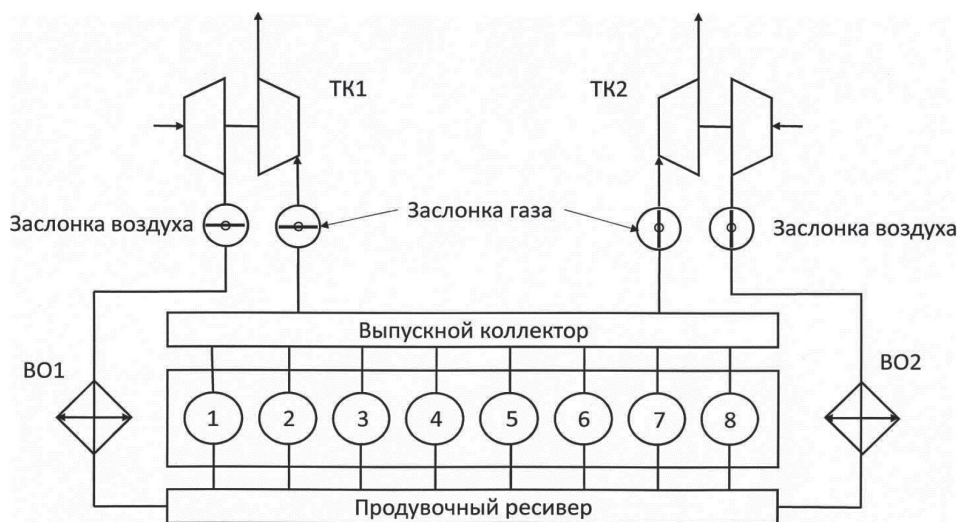


Рис. 4. Схема регистровой системы наддува с двумя ТК

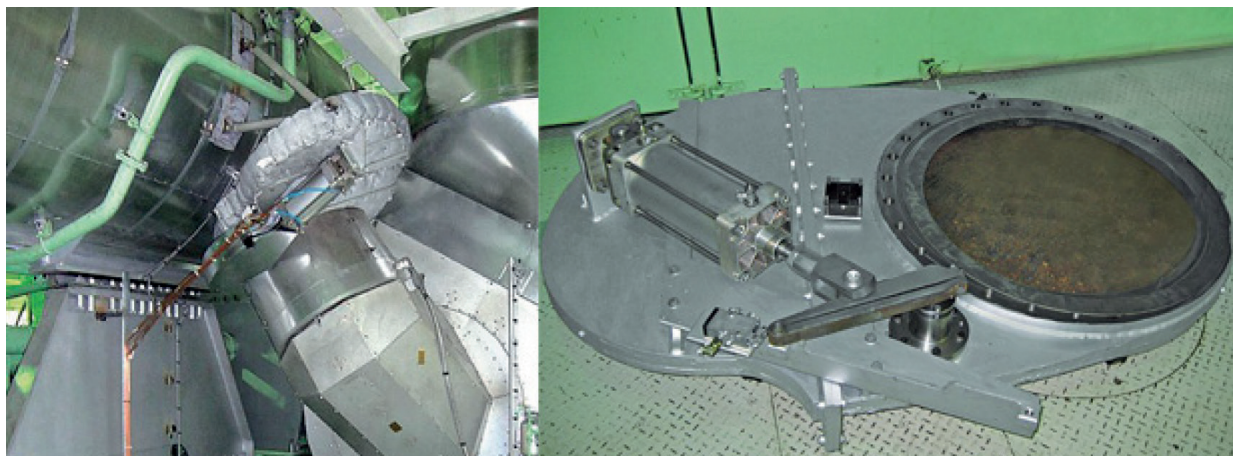


Рис. 5. Конструкция поворотного затвора и его установка на двигателе «MAN Diesel and Turbo» серии ME

Как и в случае регулируемого соплового аппарата на пониженных мощностях, экономичность двигателя повышается (рис. 6).

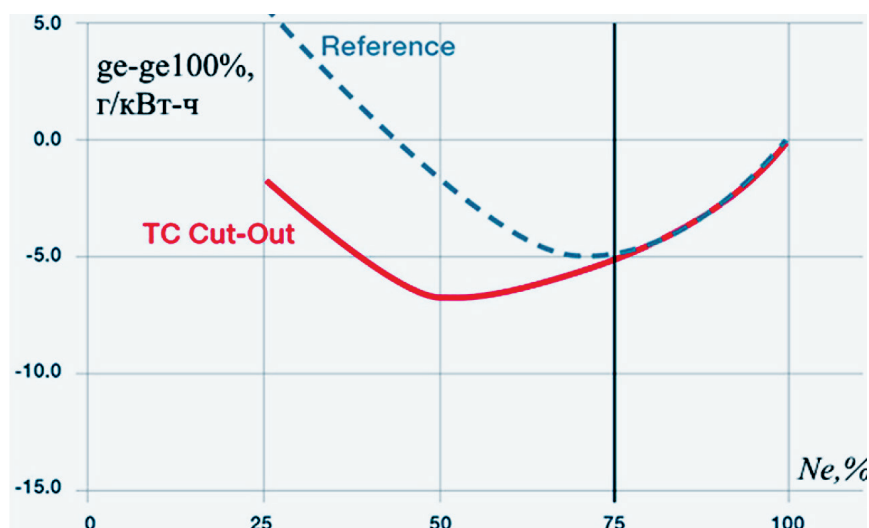


Рис. 6. Снижение удельного эффективного расхода топлива (g_e) двигателей фирмы «MAN Diesel and Turbo» серии ME при использовании системы регистрового наддува (TC Cut-Out) относительно исходной кривой (Reference)

Результаты (Results)

Подробные данные по параметрам рабочих процессов при регулировании соплового аппарата отсутствуют. Для анализа используем результаты численного моделирования [13] рабочих процессов судового малооборотного дизеля 6L60MC (6ДКРН 60/195) фирмы «МАН-Бурмейстер и Вайн». Численное моделирование проводилось для следующих режимов:

1. 100 %-я мощность с проходным сечением соплового аппарата турбины $f_t = 68 \text{ см}^2$.
2. 25 %-я мощность с проходным сечением соплового аппарата турбины $f_t = 68 \text{ см}^2$.
3. 25 %-я мощность с проходным сечением соплового аппарата турбины $f_t = 34 \text{ см}^2$.

При моделировании процессов на 25%-й мощности соответствующим образом задавались фазы топливоподачи и ее величина в соответствии с законом винтовой характеристики. Полученные данные приведены в табл. 1.

Таблица 1

Показатели дизеля 6L60MC по результатам численного моделирования

Параметр, размерность	Проходное сечение соплового аппарата		
	$f_t = 68 \text{ см}^2$	$f_t = 68 \text{ см}^2$	$f_t = 34 \text{ см}^2$
Эффективная мощность N_e , %	100 %	25 %	25 %
Индикаторная мощность N_i , кВт	18250	3925	3738
Частота вращения двигателя n , об/мин	111	71	71
Частота вращения ТК $n_{\text{ТК}}$, об/мин	15500	5450	13760
Давление наддува p_s , бар	3,23	1,22	2,6
Давление сжатия p_c , бар	107,5	42,5	104,5
Давление сгорания p_z , бар	132,2	82,4	121,5
Среднее индикаторное давление p_i , бар	18,0	10	9,6
Удельный индикаторный расход топлива g_i , г/(кВт·ч)	166	170	162
Температура ОГ t_p , °C	395	291	262
Расход воздуха (суммарный) G_a , кг/с	29,3	11,5	15,6

Полученные результаты показывают существенное улучшение работы дизеля на малой мощности при уменьшении проходного сечения турбины в два раза — возрастают обороты турбокомпрессора и, как следствие, давления наддува, сжатия, сгорания. Вследствие улучшения рабочего процесса в цилиндрах и повышения заряда воздуха при малой мощности с уменьшенным f_t снижаются удельный расход топлива (на 8 г/кВт·ч — сопоставимые данные с приведенными на рис. 3) и температура отработавших газов, что, несомненно, приведет к увеличению ресурса дизеля при длительной работе на малых мощностях. Кроме того, при регулируемом f_t нет необходимости включать электроприводные воздушодувки для обеспечения продувки цилиндров на малой мощности. Последнее позволяет существенно уменьшить расход электроэнергии (на 200 – 300 кВт·ч) и тем самым повысить энергоэффективность судна.

Проанализируем более подробно изменение показателей главного малооборотного двигателя при использовании системы регистрового наддува по эксплуатационным данным контейнеровоза дедвейтом 59307 т и скоростью хода 23,2 уз (введен в эксплуатацию в мае 2012 г.). Главный дизель 8K98ME7 фирмы «MAN Diesel and Turbo» работает на винт фиксированного шага. Восьмицилиндровый двигатель имеет электронную систему управления топливopодачей, газораспределением и регистровую систему турбонаддува с двумя ТК. В табл. 2 приведены показатели двигателя, полученные при сдаточных ходовых испытаниях.

Таблица 2

Винтовая характеристика главного двигателя 8K98ME 7

Параметр	Режим стендовой винтовой характеристики, %					
	25	50	75	85	100	110
Частота вращения n , об/мин	59,2	74,6	85,4	89,0	94,0	97,0
Эффективная мощность N_e , кВт	11225	22450	33675	38165	44900	49390
Максимальное давление цикла p_z , бар	87,6	109,5	131,0	150,3	149,6	153,0
Давление в конце сжатия p_c , бар	53,4	72,4	102,9	111,1	134,5	147,0
Давление наддува p_s , бар	0,26	0,90	1,92	2,12	2,69	3,03
Температура в ресивере t_s , °C	25	28	35	36	37	40
Частота вращения ТК $n_{\text{ТК}}$, об/мин	3734	6706	8883	9267	10136	10586
Температура ОГ t_p , °C	188	238	239	256	281	308
Температура ОГ перед турбиной t_{p1} , °C	323	347	361	371	401	408
Температура ОГ за турбиной t_{p2} , °C	255	270	230	228	236	251
Часовой расход топлива G_u , кг/ч	2081,9	3899,9	5734,8	6563,8	7932	9003,7
Удельный эффективный расход топлива g_e , г/(кВт·ч)	185,5	173,7	170,3	172,0	176,7	182,3

В табл. 3 приведены показатели, определенные на двух эксплуатационных режимах. Для режимов малой мощности приведены данные работы двигателя с двумя и одним ТК (материалы представлены старшим механиком П. Хачкаляном, измерения проводились в 2013 г.).

Таблица 3

Эксплуатационные показатели дизеля 8K98ME 7

Параметр, размерность	Работают два ТК	Работают два ТК	Работает один ТК
Эффективная мощность N_e , %	61	34	35
Эффективная мощность N_e , кВт	26503	14909	13674
Частота вращения двигателя n , об/мин	83,5	67,6	66,7
Частота вращения ТК n_{TK} , об/мин	8080	4350	8130
Давление наддува p_s , бар	2,31	1,44	2,26
Давление сжатия p_c , бар	86	59	78
Давление сгорания p_z , бар	120	97	122
Часовой расход топлива G_{ch} , кг/ч	4826	3129	2833
Удельный эффективный расход топлива g_e , г/(кВт·ч)	182,1	209,9	207,2
Скорость судна V_s , уз	20,6	17,7	17,7

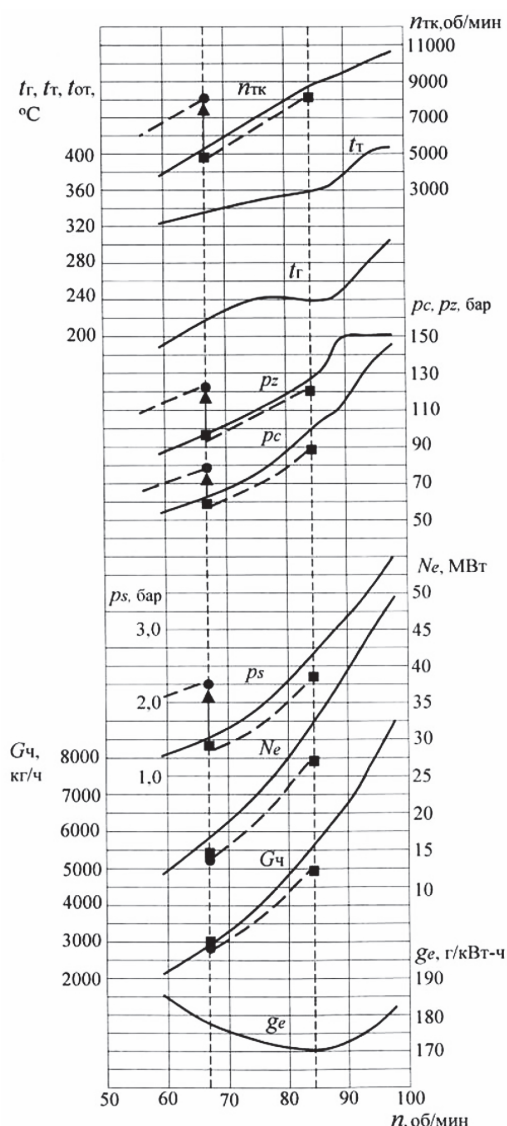


Рис. 7. Изменение показателей МОД 8K98ME7 при работе по винтовой характеристике

Показатели работы двигателя 8K98ME 7 приведены на рис. 7. Сплошными линиями показаны параметры, снятые при ходовых испытаниях, точками и штриховыми линиями — параметры на эксплуатационных режимах.

Проектная скорость хода 23,2 уз достигается при номинальной мощности двигателя 44900 кВт и частоте вращения 94 об/мин. Режим эксплуатационного полного хода (первый эксплуатационный режим) соответствует 61 % мощности двигателя при частоте вращения 83,5 об/мин (89 %), скорость хода при этом составляет 20,6 уз. На этом режиме значения всех показателей несколько меньше их величин на ходовых испытаниях, что, вполне очевидно, связано с более «легкой» эксплуатационной винтовой характеристикой. Данные по температурам отработавших газов не были представлены. Эксплуатационные значения удельного эффективного расхода топлива на обоих режимах существенно отличаются от ходовых испытаний в большую сторону, что может свидетельствовать о наличии систематических погрешностей при измерении мощности и расхода топлива.

Второй эксплуатационный режим при работе с двумя ТК соответствует $n = 67,6$ об/мин (72 %), 34 % мощности двигателя и скорости хода 17,7 уз (76 %). Продолжительная работа на этом режиме противопоказана для двигателя из-за снижения его ресурса. Положительный эффект от уменьшения удельного путевого расхода топлива главным

двигателем «нейтрализуется» увеличением расхода топлива на ВДГ вследствие необходимости включения электровоздуховок.

При использовании регистрового наддува увеличивается расход воздуха на двигатель, поэтому снижаются температуры отработавших газов на 30 – 40 °С (см. табл. 1), что благоприятно сказывается на его теплонапряженности.

Заключение (Conclusion)

Оптимизация рабочих процессов главных двигателей методом регулируемого турбонаддува позволяет существенно улучшить работу двигателя на режимах малых мощностей (менее 40 %). Параметры рабочих процессов восстанавливаются практически до значений, соответствующих режиму эксплуатационного полного хода. При этом эффект снижения эксплуатационного показателя энергоэффективности и удельных выбросов оксидов азота и серы на тонна-милю транспортной работы судна обусловлен действием следующих факторов:

- уменьшением удельного путевого расхода топлива на установку на 30 – 40 % при работе на малых мощностях;
- снижением удельного расхода топлива главного двигателя на 5 – 7 г/(кВт·ч) (2,5 – 3,0 %);
- экономией топлива при отключении электровоздуховок.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Международная Конвенция по предотвращению загрязнения с судов (МАРПОЛ-73/78). — СПб.: АО «ЦНИИМФ», 2017. — Кн. III. — 412 с.
2. Anink D. The IMO Energy Efficiency Design Index. A Netherlands Trend Study / D. Anink, M. Krikke. — Centre for Maritime Technology and Innovation, 2009. — 52 p.
3. IMO (2010a). Reduction of Green House Gas emissions from Ships, Report of the Working Group on Energy Efficiency Measures for Ships, Paper MEPC 61/WP.10. — London, United Kingdom: International Maritime Organization.
4. Вострикова М. А. О загрязнении воздушного бассейна токсичными компонентами отработавших газов морских судов / М. А. Вострикова, Я. М. Кашин, В. В. Шкода // Булатовские чтения: сб. ст. материалов I Международной науч.-практ. конф.: в 5 т.; под общ. ред. О. В. Савенков. — Краснодар: Общество с ограниченной ответственностью «Издательский Дом – Юг», 2017. — С. 102–104.
5. Семанов Г. Н. Вредные выбросы в атмосферу от судов: на пути к стандартам ИМО картографии / Г. Н. Семанов // Наука и транспорт. Морской и речной транспорт. — 2013. — № 1. — С. 45–47.
6. Пунда А. С. Рекомендации по техническому использованию главных и вспомогательных дизелей с обеспечением минимального уровня выброса экологически вредных веществ / А. С. Пунда, В. И. Дмитренко // Разд. 1 госбюджет. НИР на тему: «Техническое использование и оптимизация режимов работы автоматизированных ДЭУ». — СПб.: ГУРМФ им. адм. С. О. Макарова, 2013.
7. Пунда А. С. Повышение энергоэффективности морских судов за счет оптимизации скорости хода / А. С. Пунда, В. И. Дмитренко // Двигателестроение. — 2013. — № 4. — С. 25–30.
8. Ципелкин Г. Е. Улучшение топливной экономичности двигателей за счет оптимизации систем наддува / Г. Е. Ципелкин, В. И. Иовлев // Двигателестроение. — 2014. — № 3. — С. 16–22.
9. Камкин С. В. Повышение экономичности судовых дизелей / С. В. Камкин, А. Л. Лемещенко, А. С. Пунда. — СПб.: Судостроение, 1992. — 176 с.
10. Tier II Tuning Methods for Two-Stroke Engines [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <http://turbocharger.man.eu/technologies/tuning-methods-comparison/tuning-method-comparison> (дата обращения: 04.09.2017).
11. VTA — Variable Turbine Area [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <http://turbocharger.man.eu/technologies/tuning-methods-comparison/vta> (дата обращения: 11.09.2017).
12. Turbocharger Cut-Out [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <http://turbocharger.man.eu/technologies/tuning-methods-comparison/cut-out> (дата обращения: 11.09.2017).
13. Пунда А. С. Численное моделирование рабочих процессов судовых дизелей / А. С. Пунда. — Мортехинформреклама, 1995. — 64 с.

REFERENCES

1. *International Convention for Prevention of Pollution from Ships (MARPOL-73/78)*. Book III. SPb.: AO "TsNIIMF", 2017.
2. Anink, D., and M. Krikke. *The IMO Energy Efficiency Design Index. A Netherlands Trend Study*. Centre for Maritime Technology and Innovation, 2009.
3. *IMO (2010a). Reduction of Green House Gas emissions from Ships, Report of the Working Group on Energy Efficiency Measures for Ships, Paper MEPC 61/WP.10*. London, United Kingdom: International Maritime Organization.
4. Vostrikova, M. A., Ya. M. Kashin, and V. V. Shkoda. "About air pollution by toxic components of exhaust gases of marine vessels." *Bulatovskie chteniya: sbornik statei materialov I Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii*. Krasnodar: Obshchestvo s ogranichennoi otvetstvennost'yu "Izdatel'skii Dom - Yug", 2017: 102–104.
5. Semanov, G.N. "Vrednye vybrosy v atmosferu ot sudov: na puti k standartam IMO kartografii." *Nauka i transport: Morskoj i rechnoj transport* 1 (2013): 45–47.
6. Punda, A. S., and V. I. Dmitrenko. "Rekomendatsii po tekhnicheskomu ispol'zovaniyu glavnykh i vspomogatel'nykh dizelei s obespecheniem minimal'nogo urovnya vybrosa ekologicheskikh vrednykh veshchestv." *Razdel I gosb. NIR na temu: «Tekhnicheskoe ispol'zovanie i optimizatsiya rezhimov raboty avtomatizirovannykh DEU»*. SPb.: GURMF im. adm. S.O. Makarova, 2013.
7. Punda, A. S., and V. I. Dmitrenko. "Sea-Craft Speed Optimization as a Means of Energy Efficiency Enhancement." *Dvigatelistroyeniye* 4 (2013): 25–30.
8. Tsyplenkin, G. E., and V. I. Iovlev. "Turbocharging System Optimization as a Means to Improve Engine Fuel Efficiency." *Dvigatelistroyeniye* 3 (2014): 16–22.
9. Kamkin, S. V., A. L. Lemeshchenko, and A. S. Punda. *Povyshenie ekonomichnosti sudovykh dizelei*. SPb.: Sudostroenie, 1992.
10. Tier II Tuning Methods for Two-Stroke Engines. Web. 4 Sept. 2017 <<http://turbocharger.man.eu/technologies/tuning-methods-comparison/tuning-method-comparison>>.
11. VTA – Variable Turbine Area. Web. 11 Sept. 2017 <<http://turbocharger.man.eu/technologies/tuning-methods-comparison/vta>>.
12. Turbocharger Cut-Out. Web. 11 Sept. 2017 <<http://turbocharger.man.eu/technologies/tuning-methods-comparison/cut-out>>.
13. Punda, A.S. *Chislennoe modelirovanie rabochikh protsessov sudovykh dizelei*. Mortechnikinformreklama, 1995.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Пунда Александр Семёнович —
кандидат технических наук, профессор
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени
адмирала С. О. Макарова»
198035, Российская Федерация, Санкт-Петербург,
ул. Двинская, 5/7
e-mail: apunda@mail.ru, kaf_seu@gumrf.ru
Гурьев Юрий Георгиевич — инженер
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала
С. О. Макарова»
198035, Российская Федерация, Санкт-Петербург,
ул. Двинская, 5/7
e-mail: gurievug@gumrf.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Punda, Aleksandr S. —
PhD, professor
Admiral Makarov State University
of Maritime and Inland Shipping
5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg, 198035,
Russian Federation
e-mail: apunda@mail.ru, kaf_seu@gumrf.ru
Gur'ev, Yurii G. — Engineer
Admiral Makarov State University
of Maritime and Inland Shipping
5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg, 198035,
Russian Federation
e-mail: gurievug@gumrf.ru

Статья поступила в редакцию 17 июня 2017 г.
Received: June 17, 2017.

HARMONIZATION OF THE CONSTRUCTIVE AND CONTROLLABLE PARAMETERS OF THE DIESEL ENGINE ON THE BASIS OF THE ANALYSIS OF THE PROCESSES IN THE CYLINDER

V. V. Gavrilov¹, V. Y. Mashchenko², V. I. Zakharov²

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

² — Saint-Petersburg State Marine Technical University,
St. Petersburg, Russian Federation

The quality of the diesel engine largely depends on the consistency constructive and controllable parameters of fuel equipment and combustion chamber. The specified line is provided by this combination of parameters, which are complex processes of flow of fuel into the cylinders, distribution of the sprayed fuel jets and their interaction with the surfaces of the combustion chamber, the process heat from fuel combustion provides excellent fuel economy with acceptable environmental characteristics of the engine. The method of selecting combinations of parameters should be based on adequate description and quantification of the main processes in the engine cylinder with process heat from the combustion. To solve the problem solely according to the calculations is currently not possible. This is because, given the extreme complexity and very high processes, researchers have not yet created an adequate mathematical model. The problem solved by calculation and experiment, combining physical simulation of processes of fuel injection, the movement of the spray of fuel, their interaction with each other, with the surfaces of the combustion chamber and heat dissipation as the result of the analysis of indicator diagrams of diesel. The result of applying this method is the refinement of perception that occurs in the diesel process, in particular the temporal change of the geometrical and mass properties of fuel jets, what are the dates of deposition of fuel on the surface of the piston and the cylinder head, which factors cause changes to the shape of the fuel characteristics during combustion. The application of this methodology gives an opportunity to outline such ways of organizing processes in the cylinder, which provide high economic and environmental performance of the engine during its creation and exploitation.

Keywords: working process of diesel fuel, the movement of the fuel jets, interaction of jets with the surface of the combustion chamber, heat release during combustion.

For citation:

Gavrilov, Vladimir V., Vladimir Yu. Mashchenko, and Viktor I. Zakharov. "Harmonization of the constructive and controllable parameters of the diesel engine on the basis of the analysis of the processes in the cylinder." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 9.6 (2017): 1300–1309. DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-6-1300-1309.

УДК 621.436

СОГЛАСОВАНИЕ КОНСТРУКТИВНЫХ И РЕГУЛИРОВОЧНЫХ ПАРАМЕТРОВ ДИЗЕЛЯ НА ОСНОВЕ АНАЛИЗА ВНУТРИЦИЛИНДРОВЫХ ПРОЦЕССОВ

В. В. Гаврилов¹, В. Ю. Мащенко², В. И. Захаров²

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

² — ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный морской технический университет», Санкт-Петербург, Российская Федерация

Показатели работы дизельного двигателя существенно зависят от согласованности конструктивных и регулировочных параметров топливной аппаратуры с формой и размерами камеры сгорания. Указанная согласованность обеспечивается таким сочетанием параметров, при котором комплекс процессов

подачи топлива в цилиндр, развития топливных струй, их взаимодействия с поверхностями камеры сгорания, выделения теплоты при сгорании топлива обеспечивает высокие показатели топливной экономичности при приемлемых экологических показателях двигателя. Методика согласования параметров должна быть основана на адекватном описании и количественных оценках элементарных внутрицилиндровых процессов в сочетании с процессом выделения теплоты от сгорания топлива. Согласование исключительно расчётным путём в настоящее время невозможно. Это объясняется тем, что ввиду чрезвычайной сложности и быстротечности рассматриваемых процессов пока не созданы в должной мере адекватные их математические модели. Решить рассматриваемую задачу можно расчётно-экспериментальным путём, сочетая физическое моделирование процессов подачи топлива, развития топливных струй, их взаимодействия между собой, с поверхностями камеры сгорания и анализ выделения теплоты в дизеле по индикаторным диаграммам. В ходе использования такой методики выполняется уточнение представлений о деталях происходящих в дизеле процессов, в частности, об изменении во времени геометрических и массовых характеристик топливных струй, о моментах времени нанесения топлива на поверхности поршня, крышки и втулки цилиндра, о причинах изменения формы характеристики выделения теплоты при сгорании топлива. В результате использования такой методики получена возможность целенаправленного воздействия на внутрицилиндровые процессы, обеспечивающего высокие экономические и экологические показатели двигателя при его создании и в ходе эксплуатации.

Ключевые слова: рабочий процесс дизеля, развитие топливной струи, взаимодействие струи с поверхностью, выделение теплоты при горении.

Для цитирования:

Гаврилов В. В. Согласование конструктивных и регулировочных параметров дизеля на основе анализа внутрицилиндровых процессов / В. В. Гаврилов, В. Ю. Машенко, В. И. Захаров // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2017. — Т. 9. — № 6. — С. 1300–1309. DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-6-1300-1309.

Введение

Современные поршневые двигатели внутреннего сгорания (ДВС) должны обладать широким набором технико-экономических и экологических показателей. В зависимости от назначения и условий работы конкретного двигателя или его модификации те или иные показатели считаются приоритетными. Поэтому в каждом конкретном случае необходимо определить соответствующее сочетание конструктивных и регулировочных параметров, обеспечивающее заданные, актуальные для данного случая свойства двигателя. Известно, что показатели двигателя в значительной мере определяются совершенством внутрицилиндровых процессов — процессов смесеобразования и сгорания топлива. В свою очередь, качество этих процессов существенно зависит от характера протекания и параметров процессов подачи топлива в цилиндр двигателя, процесса распыливания топлива, развития топливных струй, их взаимодействия с поверхностями камеры сгорания (КС), самовоспламенения и горения топлива. Это означает, что указанное сочетание невозможно задать изначально при создании некоторого типоразмера двигателя для всех его модификаций, согласование параметров при необходимости следует возобновлять.

Указанные процессы нестационарны, крайне быстротечны, происходят в условиях многофазности, температурной и концентрационной неоднородности рабочего тела. Поэтому они весьма трудно поддаются изучению и адекватному описанию. В настоящее время при решении практических задач все более широкое применение находит математическое моделирование происходящих в двигателе сложных процессов. В частности, применяются средства численного моделирования газодинамических, химических, тепловых и других процессов Computational Fluid Dynamics (CFD) [1] – [4]. Подобное моделирование в некоторой степени является средством уменьшения затрат труда и времени при проектировании и доводке двигателей. Однако верификация результатов его использования, как правило, производится по конечным (итоговым) характеристикам комплекса процессов, например, по индикаторным диаграммам рабочего процесса дизеля или по получаемым обработкой этих диаграмм характеристикам выделения теплоты при сгорании топлива. Заметим, что при этом используют в основном интегральные оценки указанных диаграмм и характеристик. Для получения правдоподобных результатов моделирования приходится выполнять большую работу по идентификации параметров (как правило, большого их числа) математической

модели. Проблема состоит в том, что в распоряжении создателей двигателя отсутствует необходимый набор объективных данных об элементарных составляющих комплекса внутрицилиндровых процессов, а также о промежуточных стадиях указанного комплекса. В частности, отсутствуют необходимые сведения о локальных процессах взаимодействия топливных струй с поверхностями КС.

Качество описываемого комплекса процессов зависит от степени согласованности конструктивных и регулировочных параметров топливной аппаратуры (ТА) двигателя и его КС [5]. Ввиду того, что речь идет о регулировочных параметрах, их согласование с формой и размерами КС необходимо осуществлять не только при создании двигателя, но и в ходе его эксплуатации. Возникающее в ходе эксплуатации нарушение согласованности параметров и его причины должны быть обнаружены с помощью системы диагностирования [6].

Цель настоящего исследования состоит в разработке усовершенствованной методики согласования параметров топливной аппаратуры и КС дизельного двигателя (на основе учета локального взаимодействия топливных струй с поверхностями КС и характеристик выделения теплоты при сгорании топлива), обеспечивающей высокие экономические и экологические показатели двигателя.

Методы и материалы

Исследователями в области поршневых ДВС создан богатый задел в изучении отдельных составляющих комплекса внутрицилиндровых процессов. Важные результаты получены в исследованиях процесса распыливания топлива дизельными форсунками [7] – [9], развития топливных струй [10], испарения топлива [11], воспламенения и горения [12], [13], взаимодействия с элементами КС [14]. Однако выбор параметров элементов ТА и профиля КС, а также диагностирование технического состояния двигателя, как правило, осуществляются без комплексного учета характеристик элементарных процессов [15], [16].

Весьма важно организовать высокоэффективный рабочий процесс при создании судового дизеля и поддерживать его качество в ходе эксплуатации. В свою очередь, параметры и показатели рабочего процесса зависят от конструктивных и регулировочных параметров ТА, формы и размеров КС [5], а также от технического состояния ТА и цилиндропоршневой группы деталей дизеля. Можно выделить большое число указанных конструктивных и регулировочных параметров, влияющих на качество рабочего процесса [6]. Это означает, что при организации и текущем контроле этого качества требуется применение большого числа измерений. Чрезвычайно важным вопросом при выполнении указанной работы является установление связи между совокупностью измерений и характеристиками рабочего процесса. На наш взгляд, в настоящее время эти связи исследованы и описаны недостаточно. Поэтому, как правило, специалисты решают диагностические задачи частного характера с использованием локальных диагностических систем [17].

Авторами статьи изучены известные методы и средства контроля работы элементов дизеля, в частности, методы, основанные на результатах осциллографирования процесса топливоподачи и индицирования внутрицилиндровых процессов [18]. Анализ показал, что практически каждый из исследованных методов может позволить выявить лишь весьма ограниченное число факторов, влияющих на согласованность параметров топливоподачи с КС при создании двигателя, и выявить соответствующие его неисправности в эксплуатации. Очевидно, что известные методы не могут обеспечить достаточный уровень достоверности результатов диагностирования двигателя, так как при их использовании учитывается лишь ограниченный набор параметров рабочего процесса и в методиках, как правило, отсутствует учёт физической сущности связи между процессами, происходящими в ТА и рабочем цилиндре двигателя.

В порядке развития рассмотренных исследований необходимо сформулировать общий принцип усовершенствованной методики согласования конструктивных и регулировочных параметров топливной аппаратуры и КС дизельного двигателя при его создании, а также учёта указанной согласованности при эксплуатации двигателя. Методика должна быть построена на основе

учёта связи между характеристиками комплекса процессов топливоподачи и смесеобразования, с одной стороны, и характеристиками сгорания топлива, с другой. Весьма важную роль в решении этой задачи может играть использование предложенной авторами ранее методики анализа индикаторных диаграмм на тепловыделение при сгорании топлива [18].

Суть предлагаемой методики состоит в одновременной регистрации необходимого набора параметров топливоподачи, а также индикаторной диаграммы при расчёте параметров движения топливных струй в условиях КС, в построении характеристик тепловыделения от сгорания топлива и последующем анализе комплекса указанных данных посредством диагностической модели. Таким образом, предлагаемая методика носит расчётно-экспериментальный характер. Для реализации методики и получения необходимых расчётных зависимостей следует располагать экспериментальными данными о процессах развития топливных струй в КС и их взаимодействия с поверхностями КС.

Результаты

Результаты описания и количественных оценок процессов развития топливных струй в КС и их взаимодействия с поверхностями КС получены посредством физического моделирования указанных процессов [5]. При этом использованы комплекс средств, включающих высокоскоростную киносъёмку, специально созданный ячеистый стробоскоп в сочетании со специальным датчиком силы [19], а также средства иконики [20], представляющие собой современные средства распознавания и цифровой обработки изображений, в частности, кинограмм.

Фрагменты «обрисовки» контуров топливной струи (в двух её проекциях) для некоторых фаз её развития и взаимодействия с поверхностями модели КС показаны на рис. 1. При моделировании воспроизведены условия развития топливной струи, соответствующие дизелю типа ЧН30/38 (модификация 37ДГ-800).

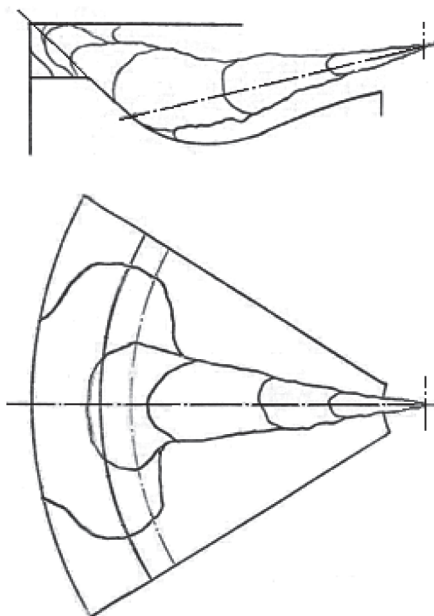


Рис. 1. Взаимодействие топливной струи с поверхностями модели КС двигателя

Представленные здесь, а также другие аналогичные результаты моделирования позволили внести уточнения в соответствующую математическую модель комплекса процессов топливоподачи, смесеобразования и сгорания в дизеле [5], [21]. Однако данная модель весьма громоздка и по этой причине её трудно использовать, например, в процессе эксплуатации двигателя при решении задач диагностирования. Поэтому для достижения поставленной в настоящей работе цели можно использовать простую математическую модель развития топливных струй и их взаимодей-

ствия с поверхностями КС, которая представляет собой набор эмпирических уравнений. Эмпирическая формула дальности l_c , мм, топливной струи имеет вид

$$l_c = 230 p_{j\max}^{0,15} d_c^{0,546} \rho_a^{(0,092 \lg \tau - 0,409)} \tau^{0,375}, \quad (1)$$

где $p_{j\max}$ — максимальное давление впрыскивания топлива, МПа; d_c — диаметр сопловых отверстий, мм; ρ_a — средняя плотность воздушного заряда цилиндра в период подачи топлива, кг/м³; τ — время, мс.

Параметры взаимодействия топливных струй с поверхностью показаны на рис. 2. В результате взаимодействия образуются пристенные потоки («топливные пятна»), относительный радиус которых зависит в основном от диаметра соплового отверстия d_c и расстояния между соплом и стенкой $l_{\text{КС}}$. Радиус топливного пятна b при $\beta = 90^\circ$ имеет следующую зависимость:

$$\frac{b}{l_c} = 0,56 \left(1 - \frac{l_{\text{КС}}}{l_c}\right)^{(-0,25 + 2,0d_c - 0,0022l_{\text{КС}})}, \quad (2)$$

где $l_{\text{КС}} / l_c \leq 1,0$.

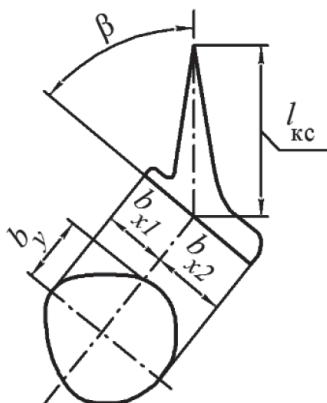


Рис. 2. Параметры взаимодействия топливной струи с плоской преградой

Другие зависимости параметров взаимодействия струи с плоской поверхностью выглядят следующим образом:

$$b_{x1} / b_{x2} = 1 - (0,5 - 0,0053\rho_a)(1 + \cos(1,2\beta - 18)); \quad (3)$$

$$(b_{x1} / b_{x2}) / 2b = 0,94 + 0,06 \cos 4(1,12\beta - 11,2); \quad (4)$$

$$b_y / b = 0,7 + 0,3 \sin(1,29\beta - 25,7), \quad (5)$$

где $30^\circ \leq \beta \leq 90^\circ$.

С использованием формул (1) – (5) могут быть построены кривые, характеризующие взаимодействие топливной струи со стенками КС, определены моменты времени начала взаимодействия топливной струи с поверхностями КС.

Наряду с рассмотренными геометрическими параметрами необходимо исследовать и описать массовые параметры, а именно распределение массы топлива в различных зонах КС, включая зону взаимодействия соседних струй. Материалом для этого служат данные, приведенные на рис. 3. Эти данные получены упомянутыми выше средствами физического моделирования и относятся к заключительной фазе подачи топлива в дизеле типа ЧН30/38.

На рис. 3, а показана полученная методом высокоскоростной киносъемки покадровая обрисовка контура струй, а на рис. 3, б — полученное методом иконки распределение относительной плотности струй в некоторый момент времени их развития. Важно отметить, что характер распределения масс топлива в развивающейся струе, зарегистрированный методом иконки [20], аналогичен характеру, полученному с использованием специального ячеистого стробо-

скопа [19]. Заметим, что один и тот же результат, зафиксированный двумя независимыми методами, может свидетельствовать о его достоверности.

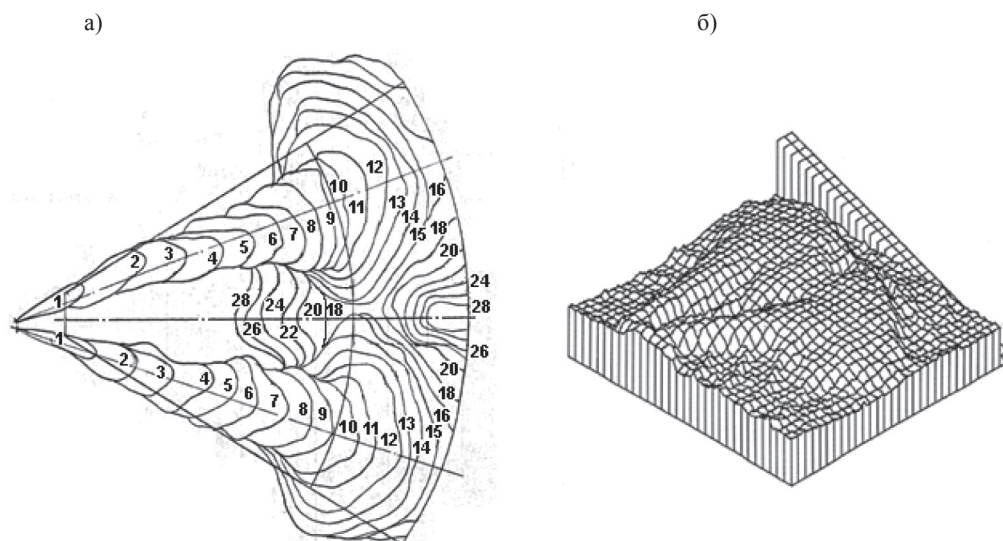


Рис. 3. Взаимодействие топливных струй со стенками КС и между собой:
а — покаторовая обрисовка контура струй (вид в плане);
б — распределение масс топлива в струях (аксонометрическое изображение)

Пример использования геометрических параметров взаимодействия топливных струй с поверхностями КС при доводке рабочего процесса двигателя в ходе его создания, а также при диагностировании в ходе эксплуатации приведен на рис. 4, на котором отображен комплекс диагностических параметров.

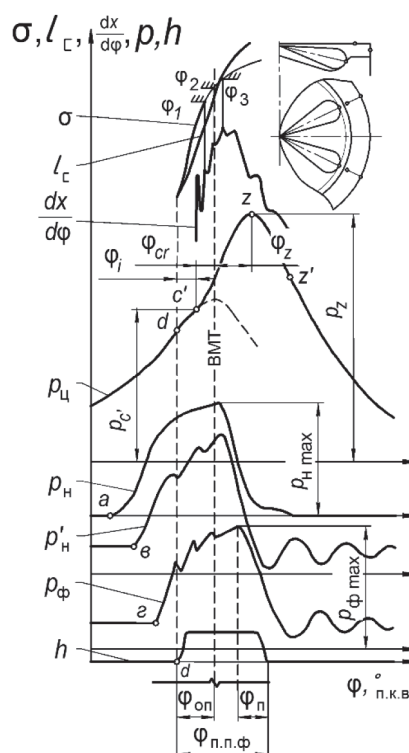


Рис. 4. Комплекс диагностических параметров: σ — доля поданного топлива;
 l_c — дальность топливной струи; $dx/d\varphi$ — относительная скорость выделения теплоты;
 p_c — давление газов в цилиндре дизеля; p_n — давление топлива в насосе;
 p'_n — давление топлива в штуцере насоса; p_ϕ — давление топлива в форсунке; h — подъем иглы форсунки

Так, на рис. 4 представлены характеристики процесса топливоподачи, движения топливных струй в КС дизеля и выделения теплоты от сгорания топлива.

Обсуждение

В результате взаимодействия топливных струй со стенками КС имеют место характерные «возмущения» на кривой $dx/d\varphi$ относительной скорости выделения теплоты (см. рис. 4). На рисунке отмечены изломы характеристики $dx/d\varphi$, соответствующие моментам времени начала взаимодействия топливной струи последовательно с поверхностью поршня, с крышкой цилиндра и со втулкой цилиндра (соответственно точки $\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3$) [22]. Излом характеристики $dx/d\varphi$ вызван снижением интенсивности горения из-за вступления топливных струй в контакт с менее нагретой поверхностью КС. Указанные моменты также отмечены на так называемой *кривой дальнобойности топливной струи* l_c . Смещение рассматриваемых характерных моментов относительно «эталонного» положения свидетельствует о нарушении согласованности параметров ТА и КС, которое может быть вызвано нарушением регулировок или изменением технического состояния элементов ТА и цилиндропоршневой группы деталей двигателя.

Анализ результатов серии экспериментов, в которых получены данные о распределении массы топлива в соседних струях, взаимодействующих в процессе контакта с поверхностями КС (см. рис. 3, б), показывает, что в двигателях исследованного класса (среднеоборотных, с объёмным смесеобразованием, диаметром цилиндра в диапазоне 230 – 300 мм, при среднем уровне форсировки рабочего процесса, соответствующем дизелю типа ЧН30/38) при наилучшем сочетании параметров ТА и конфигурации КС массовая доля топлива, содержащегося в зоне смешения струй в момент окончания подачи топлива, составляет $\bar{m}_{f_{cm}} = 7 \dots 12 \%$. При этом, как правило, обеспечивается наилучшая топливная экономичность дизеля при его приемлемых экологических показателях. В исследованных вариантах комплектации ТА и КС отклонение $\bar{m}_{f_{cm}}$ от указанного диапазона влечет за собой ухудшение показателей работы дизеля. Ухудшение в ряде случаев было связано либо с чрезмерным попаданием топлива на втулку цилиндра, либо с несвоевременным использованием воздуха для горения в периферийных зонах КС, либо с недостаточным расстоянием между соплом и КС, ограничивающим свободное развитие топливной струи, что неблагоприятно сказывается на интенсивности перемешивания топлива с воздухом.

Заключение

Высокие экономические и экологические показатели дизеля при его создании и эксплуатации могут быть обеспечены посредством согласования конструктивных и регулировочных параметров. Весьма существенную роль в обеспечении высоких показателей играет согласованность конструктивных и регулировочных параметров топливной аппаратуры и КС двигателя. Решить задачу согласования можно расчётно-экспериментальным путём, сочетая физическое моделирование процессов подачи топлива, развития топливных струй, их взаимодействия между собой, с поверхностями КС и анализ выделения теплоты в дизеле по индикаторным диаграммам. Такой подход, отличающийся, с одной стороны, комплексностью, а с другой, — «локальностью» описания отдельных процессов, позволяет выявить влияние существенных факторов на итоговые характеристики рабочего процесса дизеля, уточнить представление о деталях сложных внутрицилиндровых процессов. В частности, могут быть выявлены обстоятельства и роль нанесения топлива на поверхности КС, сформулированы принципы, которыми следует руководствоваться при профилировании КС с учётом характеристик процесса подачи топлива.

Предлагаемый подход к исследованию комплекса процессов в дизельном двигателе и разработанная методика согласованного выбора основных параметров двигателя и анализа указанной согласованности в ходе эксплуатации позволяют:

- расширить представление о происходящих в КС процессах;
- уточнить влияние тех или иных факторов на рабочий процесс дизеля и принять меры к его совершенствованию;

– разработать усовершенствованную диагностическую модель, которая даст возможность существенно увеличить число диагностических параметров и с повышенной достоверностью выявить и локализовать неисправность дизеля.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Chung T. J.* Computational Fluid Dynamics / T. J. Chung. — Second edition. — Cambridge University Press, 2010. — 1058 p.
2. 3D-CFD моделирование сгорания и теплообмена в быстроходном дизеле [Электронный ресурс]. — Режим доступа: http://www.aps-c.ru/publications/Heat_transfer_HSDI.pdf (дата обращения: 08.11.2017).
3. *Baumgarten C.* Mixture Formation in Internal Combustion Engines / C. Baumgarten. — Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 2006. — 294 p.
4. *Weinhold I.* The Three Waves of Commercial CFD // Engineering edge. — 2015. — Vol. 4. — Is. 1 [Электронный ресурс] / I. Weinhold, J. Parry. — Режим доступа: <https://www.mentor.com/products/mechanical/engineering-edge/> (дата обращения: 08.11.2017).
5. *Гаврилов В. В.* Методы повышения качества смесеобразования и сгорания в судовом дизеле на основе математического и физического моделирования локальных внутрицилиндровых процессов: дис. ... д-ра техн. наук. — СПб.: Санкт-Петербургский государственный морской технический университет, 2004. — 359 с.
6. *Гаврилов В. В.* Принципы построения иерархического комплекса систем диагностирования судового дизеля / В. В. Гаврилов, В. Ю. Машенко // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2016. — № 3 (37). — С. 155–166. DOI: 10.21821/2309-5180-2016-7-3-155-166.
7. *Гаврилов В. В.* Моделирование процесса распыливания топлива в судовом дизеле / В. В. Гаврилов // Журнал Университета водных коммуникаций. — 2009. — № 2. — С. 91–96.
8. *Saha K.* Assessment of Cavitation Models for Flows in Diesel Injectors With Single-and Two-Fluid Approaches / K Saha, X. Li // Journal of Engineering for Gas Turbines and Power. — 2016. — Vol. 138. — Is. 1. — Pp. 011504. DOI: 10.1115/1.4031224.
9. *Скоморовский С. А.* Вихревая турбулентность и кавитация в сопловом канале дизельной форсунки / С. А. Скоморовский, В. В. Гаврилов, Н. В. Семидетнов, М. Н. Голованов // Сб. науч. тр. по материалам Междунар. конф. «Двигатели-2007». — М.: МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2007. — С. 269–274.
10. *Рудаков В. А.* Исследование развития топливных струй в камерах сгорания дизелей / В. А. Рудаков, А. Н. Карелин // Вестник Московского государственного технического университета им. Н. Э. Баумана. Серия: Машиностроение. — 2012. — № 4. — С. 30–42.
11. *Кайкацишвили Г. З.* Моделирование процесса испарения капли топлива в камере сгорания дизеля / Г. З. Кайкацишвили // Наука в центральной России. — 2013. — № 4. — С. 54–63.
12. *Сеначин П. К.* Задержка воспламенения топлива в дизеле с системой топливоподачи повышенного давления / П. К. Сеначин, А. П. Сеначин // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. — 2011. — Т. 13. — № 1-2. — С. 479–486.
13. *Лазарев Е. А.* Физические концепции и математические модели процесса сгорания топлива в дизеле / Е. А. Лазарев // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Машиностроение. — 2010. — № 10 (186). — С. 32–39.
14. *Кухаренок Г. М.* Моделирование характеристик топливных струй и параметров камеры сгорания дизеля / Г. М. Кухаренок, Д. Г. Гершань // Наука и техника. — 2011. — № 4. — С. 35–39.
15. *Магафуров Р. Ж.* Методы диагностирования топливной аппаратуры дизелей / Р. Ж. Магафуров // NovaInfo.ru. — 2016. — Т. 4. — № 47. — С. 40–45.
16. Диагностика дизельной топливной аппаратуры [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <http://www.cnt-moscow.ru/ru/age/newpage/> (дата обращения: 07.11.2017).
17. *Никитин Е. А.* Диагностирование дизелей / Е. А. Никитин, Л. В. Станиславский, Э. А. Улановский [и др.]. — М.: Машиностроение, 1987. — 224 с.
18. *Гаврилов В. В.* Теоретические основы и методика анализа процесса горения в судовом ДВС по индикаторным диаграммам / В. В. Гаврилов, В. Ю. Машенко // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2016. — № 1 (35). — С. 154–164. DOI: 10.21821/2309-5180-2016-8-1-154-164.

19. Gavrilov V. V. Experimental studies of local processes as a basis of the diesel indices improvement methods / V. V. Gavrilov // Тяжелое машиностроение. — 2003. — № 11. — С. 18–20.
20. Потапов А. А. Новейшие методы обработки изображений / А. А. Потапов, Ю. В. Гуляев, С. А. Никитов, А. А. Пахомов, В. А. Герман. — М.: Физматлит, 2008. — 496 с.
21. Мащенко В. Ю. Повышение эффективности рабочих процессов в судовом дизеле согласованным выбором параметров топливной аппаратуры и камеры сгорания: дис. ... канд. техн. наук. — СПб.: ГУМРФ имени адмирала С. О Макарова, 2013. — 209 с.
22. Абрамчук Ф. И. Процессы в перспективных дизелях: сб. ст. / Ф. И. Абрамчук и [др.]; под ред. А. Ф. Шеховцова. — Харьков: Изд-во «Основа», 1992. — 352 с.

REFERENCES

1. Chung, T.J. *Computational Fluid Dynamics*. Second edition. Cambridge University Press, 2010.
2. 3D-CFD modelirovanie sgoraniya i teploobmena v bystrokhodnom dizele. Web. 8 Nov. 2017 <http://www.aps-c.ru/publications/Heat_transfer_HSDI.pdf>.
3. Baumgarten, C. *Mixture Formation in Internal Combustion Engines*. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 2006.
4. Weinhold, I., and J. Parry. “The Three Waves of Commercial CFD.” *Engineering edge* 4.1 (2015). Web. 8 Nov. 2017 <<https://www.mentor.com/products/mechanical/engineering-edge/>>.
5. Gavrilov, V.V. Metody povysheniya kachestva smeseobrazovaniya i sgoraniya v sudovom dizele na osnove matematicheskogo i fizicheskogo modelirovaniya lokal'nykh vnutrisilindrovnykh protsessov. Dr. diss. SPb.: Sankt-Peterburgskii gosudarstvennyi morskoi tekhnicheskii universitet, 2004.
6. Gavrilov, Vladimir Vasilyevich, and Vladimir Yurievich Mashchenko. “Principles of hierarchical complex systems of diagnosing marine diesel engine.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova* 3(37) (2016): 155–166. DOI: 10.21821/2309-5180-2016-7-3-155-166.
7. Gavrilov, V.V. “Model operation of process of disintegration of fuel in a marine diesel.” *Zhurnal Universiteta vodnykh kommunikatsii* 2 (2009): 91–96.
8. Saha, Kaushik, and Xianguo Li. “Assessment of Cavitation Models for Flows in Diesel Injectors With Single-and Two-Fluid Approaches.” *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power* 138.1 (2016): 011504. DOI: 10.1115/1.4031224.
9. Skomorovskii, S.A., V.V. Gavrilov, N.V. Semidetnov, and M.N. Golovanov. “Vikhrevaya turbulentnost' i kavitatsiya v soplovom kanale dizel'noi forsunki.” *Sb. nauchn. trudov po materialam Mezhdunarod. konf. «Dvigateli-2007»*. M.: MGTU im. N.E. Bauman, 2007: 269–274.
10. Rudakov, V.Yu., and A.N. Karelin. “Study of fuel jet evolution in diesel combustion chambers.” *Herald of the Bauman Moscow State Technical University. Series Mechanical Engineering* 4 (2012): 30–42.
11. Kaikatsishvili, G.Z. “The process modeling of fuel's drop evaporation in combustion chamber of diesel.” *Nauka v tsentral'noi Rossii* 4 (2013): 54–63.
12. Senachin, P.K., and A.P. Senachin. “Delay of fuel ignition in diesel engine with high pressure fuel supply system.” *Izvestia of Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences* 13.1-2 (2011): 479–486.
13. Lazarev, Evgeniy A. “Physical concertion and mathematical models of the fuel combustion process in the diesel engine.” *Bulletin of SUSU, Series “Mechanical engineering industry”* 10(186) (2010): 32–39.
14. Kukharonak, G.M., and D.G. Hershan. “Modeling of Fuel Spray Characteristics and Diesel Combustion Chamber Parameters.” *Science and Technique* 4 (2011): 35–39.
15. Magafurov, R.Zh. “Metody diagnostirovaniya toplivnoi apparatury dizelei.” *NovaInfo.Ru* 4.47 (2016): 40–45.
16. Diagnostika dizel'noi toplivnoi apparatury. Web. 7 Nov. 2017 <<http://www.cnt-moscow.ru/ru/abc/newpage/>>.
17. Nikitin, E.A., L.V. Stanislavskii, E.A. Ulanovskii, et al. *Diagnostirovanie dizelei*. M.: Mashinostroenie, 1987.
18. Gavrilov, Vladimir Vasilyevich, and Vladimir Yurievich Mashchenko. “Theoretical foundations and procedure of the analysis of process of combustion of ship internal combustion engines according to indicator diagrams.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova* 1(35) (2016): 154–164. DOI: 10.21821/2309-5180-2016-8-1-154-164.
19. Gavrilov, V.V. “Experimental studies of local processes as a basis of the diesel indices improvement methods.” *Tyazheloe mashinostroenie* 11 (2003): 18–20.

20. Potapov, A.A., Yu.V. Gulyaev, S.A. Nikitov, A.A. Pakhomov, and V.A. German. *Noveishie metody obrabotki izobrazhenii*. M.: FIZMATLIT, 2008.

21. Mashchenko, V.Yu. *Povyshenie effektivnosti rabochikh protsessov v sudovom dizele so-glasovannym vyborom parametrov toplivnoi apparatury i kamery sgoraniya*. PhD diss. SPb.: GUMRF imeni admirala S.O. Makarova, 2013.

22. Abramchuk, F.I., et al. *Protsessy v perspektivnykh dizelyakh: sb. st.* Edited by A.F. Shekhovtsova. Khar'kov: Izd-vo «Osnova», 1992.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Гаврилов Владимир Васильевич —

доктор технических наук, профессор
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала

С. О. Макарова»

198035, Российская Федерация,

Санкт-Петербург, ул. Двинская, 5/7

e-mail: gavrilov@VG5647.spb.edu, kaf_sdvs@gumrf.ru

Машенко Владимир Юрьевич —

кандидат технических наук

ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный
морской технический университет»

190121, Российская Федерация,

Санкт-Петербург, ул. Лоцманская, 3

e-mail: masvladimir@yandex.ru

Захаров Виктор Игоревич — инженер

ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный
морской технический университет»

190121, Российская Федерация,

Санкт-Петербург, ул. Лоцманская, 3

e-mail: viktor__zaharov@mail.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Gavrilov, Vladimir 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: gavrilov@VG5647.spb.edu, kaf_sdvs@gumrf.ru

Mashchenko, Vladimir Yu. —

PhD

Saint-Petersburg State Marine

Technical University

3 Lotsmanskaya Str., St. Petersburg,

190121, Russian Federation

e-mail: masvladimir@yandex.ru

Zakharov, Viktor I. — Engineer

Saint-Petersburg State Marine

Technical University

3 Lotsmanskaya Str., St. Petersburg,

190121, Russian Federation

e-mail: viktor__zaharov@mail.ru

Статья поступила в редакцию 10 ноября 2017 г.

Received: November 10, 2017.

ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ КОМПЛЕКСЫ И СИСТЕМЫ

DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-6-1310-1319

ANALYSIS OF THE CONNECTION OF ACTIVE AND REACTIVE ELECTRICAL LOADS OF LOAD-LIFTING MACHINES

O. M. Toloknova, A. V. Saushev, V. A. Shoshmin

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

Possible valuation methods of a reactive load in the systems of electrical power supply of sea and river ports are considered and analyzed. It is shown that now only the method of calculation of the resistive electrical loads is rather reasonable. Reactive loads are evaluated according to the approximate formulas which are not connected to real process of energy consumption. The method of the decision of the task of more exact determination of the consumed reactive power by load-lifting machines on the example of portal easels is offered. The method is based on statistical modeling of electrical load of group of load-lifting machines, at the same time process of electricity consumption was considered as a random variable. The offered approach allows to increase the accuracy of assessment of a reactive load and to control more reasonably process of its compensating. At the same time requirements of a power supply system to the maximum and to a minimum of consuming of reactive power are fully fulfilled and penalties for exceeding of standards in different operation modes of load-lifting machines are excluded. Methods of prediction of process of consuming of electric power are considered. It is set that more and more widely for the purposes of prediction the intellectual methods providing high reliability of the forecast in different technological operation modes of customers of electrical energy find application. The conclusion is drawn on feasibility of prediction of electrical loadings of load-lifting machines by means of a neural network which is compatible to intellectual methods of management and provides significantly lower sensitivity of a forecasting accuracy in cases of lowering of autocorrelated communication of the load graph that has essential value for the analysis of energy consumption.

Keywords: reactive load, reactive power compensation, system of electrical power supply, calculation of loadings, load-lifting machines, statistical modeling, neural network.

For citation:

Toloknova, Olga M., Aleksandr V. Saushev, and Vladimir A. Shoshmin. "Analysis of the connection of active and reactive electrical loads of load-lifting machines." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 9.6 (2017): 1310–1319. DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-6-1310-1319.

УДК 621.316

АНАЛИЗ СВЯЗИ И ПРОГНОЗИРОВАНИЕ АКТИВНЫХ И РЕАКТИВНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ НАГРУЗОК ГРУЗОПОДЪЕМНЫХ МАШИН

О. М. Толокнова, А. В. Саушев, В. А. Шошмин

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

Рассматриваются и анализируются возможные методы оценки реактивной нагрузки в системах электроснабжения морских и речных портов. Показано, что в настоящее время достаточно обоснован лишь метод расчета активных электрических нагрузок. Реактивные нагрузки оцениваются по приближенным формулам, не связанным с реальным процессом энергопотребления. Предложен метод решения задачи более точного определения потребляемой реактивной мощности грузоподъемными машинами на примере порталных кранов. Метод основан на статистическом моделировании электрической на-

грузки группы грузоподъемных машин, при этом процесс потребления электроэнергии рассматривался в качестве случайной величины. Предложенный подход позволяет повысить точность оценки реактивной нагрузки и более обоснованно управлять процессом ее компенсации. При этом в полной мере выполняются требования энергосистемы по максимуму и минимуму потребления реактивной мощности и исключаются штрафы за превышение нормативов в различных режимах работы грузоподъемных машин. Рассматриваются способы прогнозирования процесса потребления электрической мощности. Установлено, что все шире для целей прогнозирования находят применение интеллектуальные методы, обеспечивающие высокую достоверность прогноза в различных технологических режимах работы потребителей электрической энергии. Сделан вывод о целесообразности прогнозирования электрических нагрузок грузоподъемных машин с помощью нейронной сети, которая совместима с интеллектуальными методами управления и обеспечивает существенно более низкую чувствительность точности прогнозирования в случаях снижения автокорреляционной связи графика нагрузки, что имеет существенное значение для анализа энергопотребления.

Ключевые слова: реактивная нагрузка, компенсация реактивной мощности, система электроснабжения, расчет нагрузок, грузоподъемные машины, статистическое моделирование, нейронная сеть.

Для цитирования:

Толокнова О. М. Анализ связи и прогнозирование активных и реактивных электрических нагрузок грузоподъемных машин / О. М. Толокнова, А. В. Саушев, В. А. Шошмин // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2017. — Т. 9. — № 6. — С. 1310–1319. DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-6-1310-1319.

Введение

Одновременно с активной мощностью, совершающей полезную работу, в системах электроснабжения (СЭС) морских и речных портов присутствует и реактивная мощность, которая создает в электротехнических устройствах портовых перегрузочных машин электромагнитные поля, оказывающие влияние на их работу. Реактивные токи приводят к повышению потерь мощности в СЭС и электроприемниках. При больших мощностях протекание реактивного тока может привести к необходимости увеличения сечений кабельных линий и, как следствие, к увеличению капитальных затрат на создание СЭС. Одним из основных вопросов, решаемых при проектировании и эксплуатации систем электроснабжения портов, является определение полной мощности и тока, потребляемых группой электрических приемников. Таким образом, оценка реактивной составляющей расчетных нагрузок является важной задачей при проектировании СЭС, а точность ее вычисления определяет степень энерго- и ресурсосбережения.

В работах [1], [2] показано, что между величинами активных P и реактивных Q нагрузок электроприемников промышленных предприятий не существует функциональной связи, которая предполагается в применяемых в настоящее время расчетах реактивных нагрузок. Там же отмечается, что эта связь стохастическая и может быть охарактеризована через основные моменты рассматриваемых случайных величин и коэффициенты корреляции между ними.

Оценка реактивной составляющей расчетных нагрузок в принятых к практической реализации методах, как правило, выполняется косвенно через активную мощность:

$$Q_p = P_p \operatorname{tg} \varphi,$$

где $\operatorname{tg} \varphi$ — коэффициент реактивной мощности. Значения этого коэффициента определяются на основе статистического анализа и приводятся в виде точечных оценок в специальных справочниках для отдельных групп электроприемников. Точность такой оценки невысока и в отдельных случаях может превышать лишь 10 % [3].

Известны и другие методы оценки реактивной нагрузки. Например, в работе [3] рассматривается метод, основанный на показателях индивидуальных и групповых графиков реактивной нагрузки электроприемников. Применение данных методов оценки расчетных пиков и впадин графиков электрической нагрузки подразумевает, что вид и параметры нормированных корреляционных функций индивидуальных графиков активной $P(t)$ и реактивной $Q(t)$ нагрузок являются одинаковыми, и все выражения, приведенные для оценки расчетных значений активной мощно-

сти, справедливы для оценки и реактивной мощности. Информационная база исходных данных при этом представляет собой характеристики индивидуальных графиков электрической нагрузки электроприемников: количество, номинальные мощности, коэффициенты использования и загрузки, вид и параметры трансформаторной подстанции.

Анализ, выполненный авторами при исследовании процесса электропотребления металлообрабатывающих станков на промышленных предприятиях, показал, что корреляционные функции индивидуальных графиков электрической нагрузки имеют различный вид и могут быть аппроксимированы экспоненциальными и экспоненциально-косинусными функциями. Методы экспериментального определения характеристик случайных графиков нагрузки рассмотрены в работе [4]. Для грузоподъемных машин, основу которых составляют краны, такой подход еще более оправдан, так как в отличие от общепромышленных электроприемников процесс потребления электроэнергии, например, портальными кранами сопровождается значительными колебаниями напряжения и режимами торможений (противовключение с отдачей энергии в сеть однофазное). Эти обстоятельства оказывают существенное влияние на соотношения между значениями Q и P . Таким образом, для выявления метода анализа величин реактивных нагрузок необходимо провести исследование, имеющее следующие цели:

- получить соотношения между средними крановыми нагрузками P_c и Q_c ;
- установить связи между среднеквадратичными отклонениями активной и реактивной нагрузок σ_P и σ_Q ;
- вычислить коэффициент корреляции между активной и реактивной нагрузками;
- проанализировать изменения рассмотренных величин при компенсации реактивной мощности;
- осуществить анализ методов прогнозирования электрических нагрузок.

Методы и материалы

Экспериментальное исследование активных и реактивных нагрузок грузоподъемных машин проводилось в АО «Морской порт Санкт-Петербург» для группы портальных кранов. Для моделирования групповых нагрузок был использован равномерный закон распределения. Принятие такого закона было обусловлено тем, что произвольные моменты включения каждого из электроприемников равновероятны. При этом графики нагрузки суммировались со случайным сдвигом. Величина такого сдвига при моделировании на компьютере определяется при помощи специальных функций, генерирующих случайные числа.

Используя для анализа связи между средними крановыми нагрузками P_c и Q_c коэффициент реактивной мощности $\operatorname{tg} \varphi_c$, были получены его значения для двух режимов работы кранов: перегрузка навалочных и перегрузка штучных грузов. Эти значения выражаются статистическими рядами, представленными в табл. 1.

Таблица 1

Статистические данные изменения коэффициента реактивной мощности

Перегрузка навалочных грузов											
$\operatorname{tg} \varphi_i$	1,21	1,25	1,29	1,33	1,37	1,45	1,49	1,53	1,57	1,61	1,65
n_i	17	31	20	16	14	8	3	6	3	4	9
Перегрузка штучных грузов											
$\operatorname{tg} \varphi_i$	1,6	1,66	1,72	1,78	1,84	1,9	1,96	2,02	2,08	2,14	$\operatorname{tg} \varphi_i$
n_i	10	20	45	29	15	8	15	20	8	3	n_i

Примечания: 1. $\overline{\operatorname{tg} \varphi} = 1,37$; $\hat{\sigma}_{\operatorname{tg} \varphi} = 0,13$ (для случая перегрузки навалочных грузов). 2. $\overline{\operatorname{tg} \varphi} = 1,845$; $\hat{\sigma}_{\operatorname{tg} \varphi} = 0,14$, где n_i — частота наблюдений; $\operatorname{tg} \varphi_i$ — коэффициент реактивной мощности; $\overline{\operatorname{tg} \varphi}$ — среднее значение коэффициента реактивной мощности; $\hat{\sigma}_{\operatorname{tg} \varphi}$ — среднеквадратичное отклонение коэффициента реактивной мощности (для случая перегрузки штучных грузов).

Для характеристики Q_i как случайной величины недостаточно знания только Q_c , определенного через значение $\operatorname{tg} \varphi$. Однако непосредственное определение и задание основного отклонения σ_Q следует признать нерациональным. Более правильным представляется способ его определения по значению σ_P . Поэтому при исследованиях была поставлена задача определить коэффициенты, связывающие эти две величины.

Как известно [3], указанные основные отклонения могут быть записаны следующим образом:

$$\sigma_P = \sqrt{P_s^2 - P_c^2} = P_c \sqrt{k_{\Phi P}^2 - 1};$$

$$\sigma_Q = \sqrt{Q_s^2 - Q_c^2} = Q_c \sqrt{k_{\Phi Q}^2 - 1},$$

где $k_{\Phi P}$; $k_{\Phi Q}$ — коэффициенты формы графиков, соответственно, активной и реактивной нагрузок.

Тогда

$$\frac{\sigma_Q}{\sigma_P} = \frac{Q_c \sqrt{k_{\Phi Q}^2 - 1}}{P_c \sqrt{k_{\Phi P}^2 - 1}} = \operatorname{tg} \varphi_c \sqrt{\frac{k_{\Phi Q}^2 - 1}{k_{\Phi P}^2 - 1}},$$

где значение $\operatorname{tg} \varphi_c$ было определено выше, а второй множитель может быть выражен через соответствующие вариации, так как $v = \sqrt{k_{\Phi}^2 - 1}$.

Тогда

$$\frac{\sigma_Q}{\sigma_P} = \operatorname{tg} \varphi_c \frac{v_Q}{v_P}.$$

Таким образом, исследование сводится к определению соотношения между вариациями графиков нагрузок.

Полученные экспериментальные материалы позволили составить следующие ряды распределения для случайной величины v_Q / v_P при различных вариантах перегрузки (табл. 2).

Таблица 2

Статистические данные изменения отношения вариаций реактивной и активной мощностей

Перегрузка навалочного груза												
v_Q/v_P	0,3	0,33	0,36	0,39	0,42	0,45	0,48	0,51	0,54	0,57	0,6	0,63
n_i	2	5	2	9	9	27	22	13	15	4	5	4
Перегрузка штучного груза												
v_Q/v_P	0,67	0,7	0,73	0,76	0,79	0,82	0,85	0,88	0,91	0,94	0,97	1,0
n_i	1	1	8	26	32	37	19	23	19	8	3	1

Примечания: 1. $\overline{v_Q/v_P} = 0,49$; $\hat{\sigma}_{v_Q/v_P} = 0,73$ (при перегрузке навалочного груза). 2. $\overline{v_Q/v_P} = 0,82$; $\hat{\sigma}_{v_Q/v_P} = 0,055$, где n_i — частота наблюдений; $\overline{v_Q/v_P}$ — среднее значение отношений вариаций реактивной и активной; $\hat{\sigma}_{v_Q/v_P}$ — среднеквадратичное отклонение вариаций нагрузок (реактивной и активной) при перегрузке штучного груза.

Обращает на себя внимание небольшое число вариации самих статистических рядов, что свидетельствует о малой изменчивости или устойчивости рассматриваемого признака. Этот вывод позволяет в дальнейшем рекомендовать для расчетов средние значения соотношений v_Q / v_P .

Для более полной и точной оценки взаимосвязи активной и реактивной мощностей, потребляемых порталными кранами, следует определить коэффициент корреляции, поскольку, как это показано [3], связь между ними является линейной и выражается уравнением первой степени.

Коэффициент корреляции между значениями переменных X и Y удобно рассчитывать по следующей формуле:

$$r_{XY} = \frac{\text{cov}(X, Y)}{S_X S_Y} = \frac{1}{N-1} \frac{\sum_{i=1}^N (X_i - \bar{X})(Y_i - \bar{Y})}{S_X S_Y} = \frac{\sum_{i=1}^N (X_i - \bar{X})(Y_i - \bar{Y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (X_i - \bar{X})^2 \sum_{i=1}^N (Y_i - \bar{Y})^2}},$$

где S_X, S_Y — оценка средних стандартных отклонений исследуемых переменных X и Y , в качестве которых в настоящей статье рассматриваются мгновенные значения активной и реактивной мощностей, потребляемых грузоподъемными машинами при их работе.

Эмпирический коэффициент корреляции r_{XY} — это выборочная оценка для истинного коэффициента корреляции ρ_{XY} , который является количественной мерой зависимости между изучаемыми величинами. Для решения вопроса о статистической значимости эмпирического коэффициента корреляции выдвигают нулевую гипотезу $H_0 (\rho_{XY} = 0)$, а затем проверяют, не противоречит ли она экспериментальным данным. В качестве критерия проверки значимости коэффициента корреляции r_{XY} для грузоподъемных машин может быть использована статистическая оценка, рассмотренная в работе [5]:

$$(T_{vq})_{\text{кр}} = r_{XY} \sqrt{N-2} / \sqrt{1-(r_{XY})^2}.$$

Величины T_{vq} имеют распределение Стьюдента. Их значения вычислены и табулированы по заданному уровню значимости q и числу степеней свободы: $\nu = N - 2$, где N — общее число наблюдений.

Коэффициент корреляции определялся по неосредненным реализациям графиков P и Q с помощью стандартной процедуры на ЭВМ. Вычисленные значения были сведены в следующие ряды распределения (табл. 3).

Таблица 3

Статистические данные изменения коэффициента корреляции

Для варианта перегрузки навалочного груза											
$r_{P,Q}$	0,38	0,41	0,44	0,47	0,5	0,53	0,56	0,59	0,62	0,65	0,68
n_i	1	7	5	11	14	14	10	19	13	13	9
Для варианта перегрузки штучного груза											
$r_{P,Q}$	0,68	0,7	0,72	0,74	0,76	0,78	0,8	0,82	0,84	0,86	
n_i	6	7	20	17	27	41	24	15	16	5	

Примечания: 1. $\overline{r_{P,Q}} = 0,575$; $\hat{\sigma} = 0,08$ (для перегрузки навалочного груза). 2. $\overline{r_{P,Q}} = 0,784$; $\hat{\sigma} = 0,098$, где n_i — частота наблюдений; $r_{P,Q}$ — коэффициент корреляции; $\overline{r_{P,Q}}$ — среднее значение коэффициента корреляции; $\hat{\sigma}$ — среднеквадратичное отклонение коэффициента корреляции (для перегрузки штучного груза).

Важнейшей задачей планирования и оперативного управления процессом энергопотребления является прогнозирование электрических нагрузок грузоподъемных машин. Достоверный прогноз позволяет выбирать оптимальные режимы работы системы электроснабжения, повышать ее экономичность и надёжность, управлять процессом компенсации реактивной мощности.

Известные методы прогнозирования электрических нагрузок различаются между собой как сложностью использования, объемом исходной информации, так и точностью конечного результата [5]. Наиболее широко в настоящее время применяются методы прогнозирования по среднему значению мощности за предыдущий интервал времени, статистические методы, а также интеллектуальные методы, основанные на использовании нейронных сетей [6] — [9].

Метод прогнозирования по среднему значению является самым простым. При его использовании вычисляется среднее значение исследуемой переменной на основании полученных значений на определенном интервале времени. Далее строится вектор прогнозных значений этой переменной, причем график данного прогноза представляет прямую линию.

Прогнозирование значений электрических нагрузок на основе статистических методов является в настоящее время одним из самых распространенных. Наиболее часто для целей прогнозирования используется экстраполяция данных [10]. В ее основу положено предположение о том, что рассматриваемый процесс имеет две составляющие: постоянную (линия тренда), которая представляет собой гладкую функцию от времени, и случайную некоррелированную составляющую с нулевым математическим ожиданием, оценка которой необходима для определения точностных характеристик прогноза. При этом упор делается на математическое описание тренда, основанного на анализе априорной информации, обеспечивающего наибольшую достоверность прогноза [5].

Методы прогнозирования на основе нейронных сетей являются относительно новыми и до конца не разработанными. Как известно, нейронная сеть — это эффективный метод имитации процессов и явлений, который позволяет воспроизводить очень сложные зависимости [11]. Основное отличие этого метода заключается в использовании процесса обучения, при котором задаются исходные данные, цели прогнозирования и автоматически определяются параметры самой сети [6]. Непосредственно нейронная сеть не прогнозирует будущее, она на основании априорной информации оценивает состояние исследуемой переменной в данный момент времени и «старается» воспроизвести его поведение в последующие моменты времени.

Результаты и обсуждение

Вычисленные средние значения коэффициента корреляции свидетельствуют о том, что особенности работы порталных кранов [4] оказывают значительное влияние на параметры нагрузок и подтверждают условность применяемого в настоящее время метода расчета реактивных нагрузок.

Таким образом, проведенное исследование позволило получить достаточно исчерпывающие характеристики для описания связи активных и реактивных нагрузок, создаваемых перегрузочными машинами. Однако ввиду того, что в портах широко применяется компенсация реактивной мощности, необходимо выяснить, как изменяются указанные характеристики при наличии компенсирующих устройств. С этой целью были проанализированы реализации графиков нагрузки P и Q при работе пятитонных кранов на навалочном грузе [3]. Исходные реализации характеризуются $\cos \varphi = 0,618$ и коэффициентом корреляции $r_{P,Q} = 0,697$.

При наличии постоянно включенного компенсирующего устройства для компенсации реактивной мощности до соответствующего значения $\cos \varphi$ изменится лишь Q_c , а остальные вероятностные характеристики останутся без изменений, поскольку вычитание постоянной величины из значений случайной величины не меняет основных моментов последней.

При наличии регулируемого компенсирующего устройства, поддерживающего $\cos \varphi$ на определенном уровне, вероятностные характеристики Q меняются. В этом случае случайные величины Q_i связываются со значениями P_i соотношением

$$Q_i = P_i \operatorname{tg} \varphi_n,$$

где $\operatorname{tg} \varphi_n$ — некоторая заданная величина, соответствующая желаемому значению $\cos \varphi_n$.

Следовательно, ряд распределения случайной величины получается из ряда распределения P_i путем умножения на некоторый постоянный коэффициент. Неизменными остаются лишь значения Q_i , соответствующие неравенству

$$\operatorname{tg} \varphi_i < \operatorname{tg} \varphi_n.$$

Чем выше значение $\cos \varphi$, тем меньше количество неизменных Q_i и тем теснее связь активных и реактивных нагрузок. Очевидно, что в этом случае $v_Q = v_p$ и $\sigma_Q = \sigma_p \operatorname{tg} \varphi_n$.

Следовательно, при регулировании потребляемой реактивной мощности в функции $\cos \varphi$ основные параметры определяются как

$$Q_c = P_c \operatorname{tg} \varphi_n;$$

$$\sigma_Q = \sigma_p \operatorname{tg} \varphi_n.$$

Для значений $\cos \varphi = 0,9 - 0,92$ можно считать $r_{p,Q} \approx 1$.

При компенсации реактивной мощности на порталных кранах компенсирующее устройство присоединяется к контакторам двигателей подъема, мощность которых составляет более 80 % от общей установленной мощности крана. Включение и отключение компенсирующего устройства происходит одновременно с включением и отключением двигателей подъема. Поэтому в первом приближении можно считать, что кран оборудован регулируемым компенсирующим устройством, и применить полученные ранее выводы к этому случаю.

Анализ электрических нагрузок грузоподъемных машин позволяет сделать следующие выводы относительно перспектив использования рассмотренных методов прогнозирования для случайного процесса изменения реактивной мощности с нормальным законом распределения.

Прогнозирование по среднему значению является наименее точным во всем диапазоне изменений параметров автокорреляционной функции, т. е. прогноз реактивных нагрузок является наиболее неэффективным среди рассматриваемых методов. Он может быть использован для прогнозирования графиков нагрузки, для которых отсутствует автокорреляционная связь (при значениях коэффициента затухания автокорреляционной функции более 10,0 1/с). Для грузоподъемных машин, работающих, как правило, в интенсивном повторно-продолжительном режиме, такие режимы встречаются крайне редко.

Прогнозирование с помощью статистических методов характеризуется достаточно малой погрешностью при небольших величинах коэффициента затухания автокорреляционной функции, порядка 10^{-3} 1/с. При росте коэффициента затухания погрешность прогнозирования нелинейно возрастает. Эти методы отличает простота использования и небольшие временные затраты на их практическую реализацию [12].

Прогнозирование с помощью нейронной сети является наиболее эффективным методом для исследования электрических нагрузок грузоподъемных машин. При этом значение коэффициента затухания корреляционной функции должно быть в диапазоне $(2 \cdot 10^{-3} \dots 2 \cdot 10^{-1})$ 1/с. Это соответствует случаям плавно изменяющихся графиков нагрузки, когда имеет место автокорреляционная связь [13]. Преимуществом прогнозирования электрических нагрузок с помощью нейронной сети является их совместимость с интеллектуальными методами управления [14], [15], а также существенно более низкая чувствительность точности прогнозирования в случаях снижения автокорреляционной связи графика нагрузки, что имеет существенное значение для анализа энергопотребления грузоподъемных машин [7].

Полученные результаты согласуются с результатами работ [6] по исследованию точности прогнозирования реактивных нагрузок металлообрабатывающих станков и моделированию графика потребления реактивной мощности на компьютере в программной среде Matlab в предположении нормального закона распределения и использования экспоненциально-косинусной корреляционной функции.

Выводы

1. Между активными и реактивными нагрузками существует стохастическая связь, приближающаяся к функциональной тем ближе, чем выше уровень управляемой компенсации реактивной мощности.
2. Вычисленные средние значения статистических коэффициентов: коэффициента корреляции, среднеквадратичного отклонения реактивной нагрузки, коэффициента реактивной мощно-

сти для различных вариантов перегрузки груза, показали значительное влияние технологических факторов на параметры нагрузок порталных кранов.

3. Для прогнозирования электрических нагрузок грузоподъемных машин, электроприводы которых работают, как правило, в интенсивном повторно-кратковременном режиме работы, перспективным представляется использование теории нейронных сетей, обеспечивающей получение достоверных и устойчивых результатов при циклическом и сложном характере технологических процессов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Железко Ю. С. Компенсация реактивной мощности и повышение качества электроэнергии / Ю. С. Железко. — М.: Электроатомиздат, 1985. — 224 с.
2. Савина Н. В. Прогнозирование реактивной мощности узлов нагрузки для оптимальной компенсации реактивной мощности в условиях неопределенности / Н. В. Савина, А. А. Казакул // Вестник Иркутского государственного технического университета. — 2012. — № 2 (61). — С. 92–99.
3. Шошмин В. А. Использование статистических характеристик электрических нагрузок порталных кранов для расчета электрических сетей портов / В. А. Шошмин // Электрификация и автоматизация водного транспорта: сб. тр. молодых научных работников. — Л.: ЛИВТ, 1975. — 134 с.
4. Толокнова О. М. Исследование электропотребления перегрузочными машинами / О. М. Толокнова, Л. М. Бровцинова, В. А. Шошмин // Сб. науч. тр. по материалам Международной научно-практической конференции «Наука и образование в жизни современного общества» 30.04. 2015 г. — Тамбов: ООО Консалтинговая компания «Юком», 2015. — Т. 8. — С. 40–42.
5. Саушев А. В. Планирование эксперимента в электротехнике / А. В. Саушев. — СПб.: СПбГУВК, 2012. — 273 с.
6. Саенко Ю. Л. Анализ методов прогнозирования реактивных нагрузок промышленных предприятий / Ю. Л. Саенко, В. В. Любарцев // Вестник Приазовского государственного технического университета. — 2015. — № 30 (2). — С. 129–137.
7. Манусов В. З. Краткосрочное прогнозирование электрической нагрузки на основе нечеткой нейронной сети и ее сравнение с другими методами / В. З. Манусов, Е. В. Бирюков // Известия Томского политехнического университета. — 2006. — Т. 309. — № 6. — С. 153–157.
8. Tushar W. Prioritizing consumers in smart grid: A game theoretic approach / W. Tushar, J. A. Zhang, D. B. Smith, H. V. Poor, S. Thiebaut // IEEE Transactions on Smart Grid. — 2014. — Vol. 5. — Is. 3. — Pp. 1429–1438. DOI: 10.1109/TSG.2013.2293755.
9. Varaiya P. P. Smart operation of smart grid: Risk-limiting dispatch / P. P. Varaiya, F. F. Wu, J. W. Bialek // Proceedings of the IEEE. — 2011. — Vol. 99. — Is. 1. — Pp. 40–57. DOI: 10.1109/JPROC.2010.2080250.
10. Степанов В. П. Анализ автокорреляционных функций графиков активной и реактивной нагрузки металлообрабатывающих станков / В. П. Степанов, А. В. Гудков, Ю. С. Смирнова, К. С. Аверьянова // Известия высших учебных заведений. Электромеханика. — 2014. — № 3. — С. 28–30.
11. Хайкин С. Нейронные сети: полный курс / С. Хайкин. — М.: Издат. дом «Вильямс», 2006. — 1104 с.
12. Фролов В. Я. Графики активной и реактивной нагрузки бытовых потребителей / В. Я. Фролов, А. В. Коротков // Вестник Ивановского государственного энергетического университета. — 2011. — № 5. — С. 29–31.
13. Кронгауз Д. Э. Методы и средства регулирования активной и реактивной мощности в городской электрической сети / Д. Э. Кронгауз // Промышленная энергетика. — 2011. — № 3. — С. 45–48.
14. Саушев А. В. Прогнозирование состояния электротехнических систем на основе информационных технологий / А. В. Саушев, К. К. Гаспарян // Международный научно-исследовательский журнал. — 2015. — № 7-1 (38). — С. 93–95.
15. Gao F. A control strategy for a distributed generation unit in grid-connected and autonomous modes of operation / F. Gao, M. R. Iravani // IEEE Transactions on Power Delivery. — 2008. — Vol. 23. — Is. 2. — Pp. 850–859. DOI: 10.1109/TPWRD.2007.915950.

REFERENCES

1. Zhelezko, Yu. S. *Kompensatsiya reaktivnoi moshchnosti i povyshenie kachestva elektroenergii*. M.: Elektroatomizdat, 1985.
2. Savina, Natalya, and Aleksei Kazakul. "Prediction of reactive power of load nodes for the optimal compensation of reactive power under uncertainty." *Proceedings of Irkutsk State Technical University* 2(61) (2012): 92–99.
3. Shoshmin, V. A. "Ispol'zovanie statisticheskikh kharakteristik elektricheskikh nagruzok portal'nykh kranov dlya rascheta elektricheskikh setei portov." *Elektrifikatsiya i avtomatizatsiya vodnogo transporta: sb. trudov molodykh nauchnykh rabotnikov*. L.: Izd-vo LIVTa, 1975.
4. Toloknova, O. M., L. M. Brovtsinova, and V. A. Shoshmin. "Issledovanie elektropotrebleniya peregruzochnymi mashinami." *Sbornik nauchnykh trudov po materialam mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii «Nauka i obrazovanie v zhizni sovremennogo obshchestva» 30.04. 2015 g.: T. 8*. Tambov: OOO Konsaltingovaya kompaniya «Yukom», 2015: 40–42.
5. Saushev, A. V. *Planirovanie eksperimenta v elektrotekhnike*. SPb.: S.-Peterb. gos. un-t vodnykh kommunikasiy, 2012.
6. Saenko, Yu. L., and V. V. Lyubartsev. "Analiz metodov prognozirovaniya reaktivnykh nagruzok promyshlennykh predpriyatiy." *Vestnik Priazovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* 30(2) (2015): 129–137.
7. Manusov, V.Z., and E.V. Biruikov. "Short-term load prediction on the basis of fuzzy neural network and its comparison with other methods." *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University* 309.6 (2006): 153–157.
8. Tushar, Wayes, J.A. Zhang, D.B. Smith, H.V. Poor, and S. Thiebaux. "Prioritizing consumers in smart grid: A game theoretic approach." *IEEE Transactions on Smart Grid* 5.3 (2014): 1429–1438. DOI: 10.1109/TSG.2013.2293755.
9. Varaiya, Pravin P., Felix F. Wu, and Janusz W. Bialek. "Smart operation of smart grid: Risk-limiting dispatch." *Proceedings of the IEEE* 99.1 (2011): 40–57. DOI: 10.1109/JPROC.2010.2080250.
10. Stepanov, V.P., A.V. Gudkov, Yu.S. Smirnova, and K.S. Aver'yanova. "Analiz avtokorrelyatsionnykh funktsii grafikov aktivnoi i reaktivnoi nagruzki metalloobrabatyvayushchikh stankov." *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Elektromekhanika* 3 (2014): 28–30.
11. Khaikin, S. *Neironnye seti: polnyi kurs*. M.: Izdatel'skii dom «Vil'yams», 2006.
12. Frolov, V.Ya., and A.V. Korotkov. "Grafiki aktivnoi i reaktivnoi nagruzki bytovykh potrebitelei." *Vestnik ivanovskogo gosudarstvennogo energeticheskogo universiteta* 5 (2011): 29–31.
13. Krongauz, D. E. "Metody i sredstva regulirovaniya aktivnoi i reaktivnoi moshchnosti v gorodskoi elektricheskoi seti." *Promyshlennaya energetika* 3 (2011): 45–48.
14. Saushev, A.V., and K.K. Gasparyan. "Forecasting of the condition of electrotechnical systems on the basis of information technologies." *International Research Journal* 7-1(38) (2015): 93–95.
15. Gao, Fang, and M. Reza Iravani. "A control strategy for a distributed generation unit in grid-connected and autonomous modes of operation." *IEEE Transactions on Power Delivery* 23.2 (2008): 850–859. DOI: 10.1109/TPWRD.2007.915950.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Толокнова Ольга Михайловна —
старший преподаватель
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени
адмирала С. О. Макарова»
198035, Российская Федерация, Санкт-Петербург,
ул. Двинская, 5/7
e-mail: olga_toloknova@mail.ru,
kaf_electroprivod@gumrf.ru
Саушев Александр Васильевич —
доктор технических наук, профессор
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала
С. О. Макарова»
198035, Российская Федерация, Санкт-Петербург,
ул. Двинская, 5/7
e-mail: saushev@bk.ru, SaushevAV@gumrf.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Toloknova, Olga M. —
Senior lecturer
Admiral Makarov State University of Maritime
and Inland Shipping
5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg 198035,
Russian Federation
e-mail: olga_toloknova@mail.ru,
kaf_electroprivod@gumrf.ru
Saushev, 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: saushev@bk.ru, SaushevAV@gumrf.ru

Шошмин Владимир Александрович —
доктор технических наук, профессор
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала
С. О. Макарова»
198035, Российская Федерация, Санкт-Петербург,
ул. Двинская, 5/7
e-mail: vshoshmin@yandex.ru,
kaf_electroprivod@gumrf.ru

Shoshmin, 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: vshoshmin@yandex.ru,
kaf_electroprivod@gumrf.ru

*Статья поступила в редакцию 7 ноября 2017 г.
Received: November 7, 2017.*

ESTIMATION OF ELECTRICITY QUALITY AT THE VESSEL IN THE OPERATION PROCESS

S. E. Kuznetsov, Yu. V. Kudryavtsev, A. A. Vinogradov

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

The scheme for the distribution of electric power of the tanker "Ligovsky Prospekt" containing three diesel generator sets with brushless three-phase synchronous generators with an active capacity of 750 kW, a total power of 937.5 kVA, a voltage of 440 V, a frequency of 60 Hz, a rated current of 1203 A, a power factor of 0,8. The main power quality indicators and the requirements for them of the IEC and the Russian Maritime Register of Shipping are given. The characteristics two devices "Energotester PKE-06" of domestic production are described with the help of which the main energy indicators (phase and line voltages, phase and linear currents, active, reactive and full power, load power factor, load factor) and power quality indicators (voltage deviation, frequency deviation, non-sinusoidal coefficient and others) on a tank with single operation of diesel-generator sets (DGA) and with parallel (running, maneuvering, parking in the roadstead) in the electric circuits of generators and receivers (electric drives: electric drive of ballast pump No. 2, power 315 kW, electric drive of inert gas fan, power 126 kW, electric drive of ballast pump No. 1, the power of 160 kW). The duration of the measurement for running, maneuvering and parking mode in the roadstead was at least 24 hours with 30 minutes averaging. The analysis of power quality indicators based on their measured values and graphical dependencies on time showed the compliance of the quality of electricity with the requirements of the IEC and the Russian Maritime Register of Shipping.

Keywords: vessel, electro-power supply system, power quality indicators, "Energotester PCE-06" instrument, measuring and recording, electric generators and receivers.

For citation:

Kuznetsov, Sergey Ye., Yuri V. Kudryavtsev, and Andrei A. Vinogradov. "Estimation of electricity quality at the vessel in the operation process." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admiral S. O. Mararova* 9.6 (2017): 1320–1329. DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-6-1320-1329.

УДК 621.317:629.12083.72

ОЦЕНКА КАЧЕСТВА ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ НА СУДНЕ В ПРОЦЕССЕ ЭКСПЛУАТАЦИИ

С. Е. Кузнецов, Ю. В. Кудрявцев, А. А. Виноградов

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

*Рассмотрена схема распределения электроэнергии танкера «Лиговский проспект», содержащая три дизель-генераторных агрегата с бесщёточными трехфазными синхронными генераторами активной мощностью 750 кВт, полной мощностью 937,5 кВА, напряжением 440 В, частотой 60 Гц, номинальным током 1203 А, коэффициентом мощности — 0,8. Приведены основные показатели качества электроэнергии и требования к ним Международной электротехнической комиссией и Российского морского регистра судоходства. Описаны характеристики двух приборов «Энерготестер ПКЭ-06» отечественного производства, с помощью которых произведены измерение и регистрация основных энергетических показателей (фазные и линейные напряжения, фазные и линейные токи, активная, реактивная и полная мощность, коэффициент мощности нагрузки, коэффициент нагрузки) и показателей качества электроэнергии (отклонение напряжения, отклонение частоты, коэффициент несинусоидальности и др.) на танкере при оди-
ночной работе дизель-генераторных агрегатов (ДГА) и при параллельной работе двух ДГА в различных эксплуатационных режимах судна (ходовой, маневренный, стоянка на рейде) в электроцепях генераторов и приемников (электроприводов: электропривод балластного насоса № 2 мощностью 315 кВт, электропривод вентилятора инертных газов мощностью 126 кВт, электропривод балластного насоса № 1 мощ-*

ностью 160 кВт и др.). Продолжительность измерения для ходового, маневренного режимов и режима стоянки на рейде составляла не менее 24 ч с 30-минутным усреднением. Анализ показателей качества электроэнергии по их измеренным значениям и графическим зависимостям от времени показал соответствие качества электроэнергии требованиям МЭК и Российского морского регистра судоходства.

Ключевые слова: судно, система электроснабжения, показатели качества электроэнергии, прибор «Энерготестер ПКЭ-06», измерения и регистрация, электроцепи генераторов и приемников.

Для цитирования:

Кузнецов С. Е. Оценка качества электроэнергии на судне в процессе эксплуатации / С. Е. Кузнецов, Ю. В. Кудрявцев, А. А. Виноградов // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2017. — Т. 9. — № 6. — С. 1320–1329. DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-6-1320-1329.

Введение

Основные энергетические показатели и показатели качества электроэнергии измерялись и регистрировались на танкере «Лиговский проспект». На рис. 1 представлена однолинейная схема распределения электроэнергии танкера от источников — судовых бесщёточных синхронных генераторов, до основных приемников и распределительных щитов судна. Распределение электроэнергии осуществляется по фидерному методу, что повышает надежность электроснабжения.

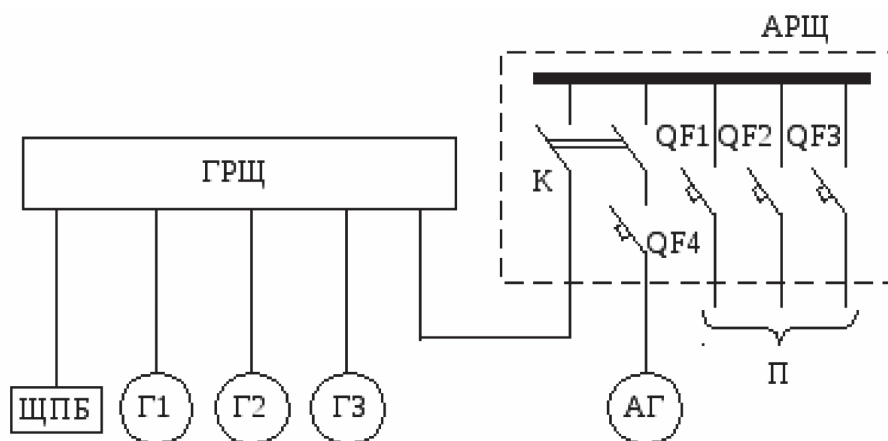


Рис. 1. Однолинейная схема распределения электроэнергии танкера «Лиговский проспект»

В состав судовой электроэнергетической системы судна входят две электростанции: основная и аварийная. Основные параметры электроэнергии: трехфазный переменный ток напряжением 450 В, частотой 60 Гц. Основные источники электроэнергии — три дизель-генераторных агрегата (ДГА) с номинальными параметрами генераторов: мощность $P = 750$ кВт, $S = 937,5$ кВ·А, ток $I = 1203$ А, коэффициент мощности $\cos \varphi = 0,8$. Аварийный источник электроэнергии: один ДГА, $P = 120$ кВт, $S = 150$ кВ·А, ток $I = 192$ А, $\cos \varphi = 0,8$.

Основная электростанция состоит из главного распределительного щита (ГРЩ) и трех дизель-генераторов. ГРЩ содержит три генераторные секции, секцию управления, 13 силовых секций и одну секцию приемников 220 В. Шины ГРЩ разделены на две секции секционным автоматическим выключателем. К секции управления ГРЩ кабельной перемычкой подключены аварийный распределительный щит (АРЩ) и щит питания с берега.

Надежность электроснабжения основных приемников электроэнергии, которые осуществляют движение, управление и безопасность судна обеспечивается резервированием и подключением их к разным секциям шин ГРЩ или к шинам АРЩ.

Аварийная электростанция состоит из АРЩ и аварийного дизель-генератора мощностью 120 кВт. АРЩ состоит из генераторной секции, секций приемников 440 В и 220 В. Питание приемников электроэнергии 220 В осуществляется с помощью силового трансформатора 440/220 В.

Наиболее энергоёмкими приёмниками электроэнергии являются электроприводы нагнетателей с асинхронными двигателями: балластный насос № 2 ($P = 315$ кВт), балластный насос № 1 ($P = 160$ кВт), вентилятор инертных газов ($P = 126$ кВт), основной масляный насос ($P = 95$ кВт), основной насос питательной воды вспомогательного котла ($P = 60$ кВт), пожарный насос ($P = 85$ кВт).

Методы и материалы

Качество электрической энергии, под которым понимается совокупность свойств электроэнергии, характеризующих её пригодность для питания судового электрооборудования, на судах определяется в соответствии с требованиями Международной электротехнической комиссии (МЭК) и классификационных обществ [1]. Вопросы качества электроэнергии рассматривались в [2].

Качество электроэнергии характеризуется показателями, для которых определён допустимый диапазон отклонения от их номинальных значений, выраженный в процентах.

Основными показателями качества электроэнергии являются:

- отклонения напряжения $dU = (U - U_n) / U_n \cdot 100 \%$;
- отклонения частоты $df = (f - f_n) / f_n \cdot 100 \%$;
- коэффициент несинусоидальности линейного напряжения $K_U, \%$:

$$K_U = \frac{\sqrt{2 \sum_{v=2}^{200} U_v^2}}{U_1} \cdot 100 \%;$$

где U и f — соответственно текущие значения напряжения и частоты; U_n и f_n — соответственно номинальные значения напряжения и частоты; U_1 — напряжение первой гармоники; v — порядок высшей гармоники.

Требования к показателям качества электроэнергии — параметрам электрической энергии, которые характеризуют работу ДГА в установившемся и динамическом (набросе и сбросе нагрузки) режиме работы и параметрам электрической энергии, которые характеризуют её пригодность для питания судовых приёмников электроэнергии в установившемся и динамическом режимах работы.

Для дизеля:

- при мгновенном сбросе 100 % нагрузки или двухступенчатом набросе 100 % кратковременное изменение частоты вращения двигателя не должно превышать 10 % расчётной частоты вращения, а установившаяся частота вращения должна достигаться в течение не более 5 с;
- установившаяся частота вращения не должна колебаться более чем на $\pm 1 \%$ частоты вращения, соответствующей конкретной установившейся нагрузке генератора.

Для генератора:

- генераторы переменного тока должны иметь системы автоматического регулирования напряжения, обеспечивающие поддержание напряжения в пределах $\pm 2,5 \%$ от номинального при изменении нагрузки от нуля до номинальной при номинальном коэффициенте мощности;
- внезапное изменение симметричной нагрузки генератора, работающего при номинальной частоте вращения и номинальном напряжении, при имеющихся токе и коэффициенте мощности, не должно вызывать снижения напряжения ниже 85 % и повышения выше 120 % от номинального значения;
- по окончании переходных процессов напряжение генератора должно восстанавливаться в течение не более 1,5 с с отклонением от номинального значения в пределах $\pm 3 \%$;
- отклонение от синусоидальной формы напряжения не должно превышать 5 % от пикового значения его основной гармонической составляющей.

При этом допустимые отклонения параметров питания судовых приёмников электроэнергии следующие:

1) установившееся отклонение напряжения по отношению к номинальному значению $+6 \dots -10 \%$ и частоты $\pm 5 \%$.

2) кратковременное отклонение напряжения $\pm 20 \%$ с временем восстановления не более 1,5 с и частоты $\pm 10 \%$ с временем восстановления не более 5 с.

Отклонения от синусоидальной формы напряжения на клеммах приёмников электроэнергии не должно превышать 10 % от пикового значения его основной гармонической составляющей.

Исходя из ранее указанных требований, во время энергетического обследования были измерены основные показатели качества электроэнергии на шинах работавших генераторов и приёмников электроэнергии.

Методика оценки показателей качества электроэнергии

Для измерения электроэнергетических величин показателей качества электрической энергии использовалось два прибора «Энерготестер ПКЭ-06» [3] отечественного производства фирмы «Марс-Энерго» (рис. 2).



Рис. 2. Внешний вид прибора «Энерготестер ПКЭ-06»

Приборы для измерения электроэнергетических величин и показателей качества электрической энергии «Энерготестер-ПКЭ-06» предназначены для следующих целей:

- измерения и регистрации основных показателей качества электроэнергии (ПКЭ), установленных ГОСТ 13109-97 и EN 50160;
- измерения и регистрации основных параметров электрической энергии в однофазных и трехфазных электрических сетях: действующих значений напряжений и токов при синусоидальной и искаженной форме кривых; активной, реактивной и полной электрической мощности;
- поверки однофазных и трехфазных счетчиков активной и реактивной электрической энергии на месте эксплуатации, а также для контроля метрологических характеристик счетчиков и правильности их подключения без разрыва токовых цепей;
- поверки измерительных трансформаторов напряжения и тока на местах их эксплуатации;
- измерения параметров вторичных цепей (мощности нагрузки) в системах учета электрической энергии;
- поверки электроизмерительных приборов, энергетических измерительных преобразователей напряжения, тока, активной и реактивной мощности на месте их эксплуатации;
- измерения амплитудных и пиковых значений переменного напряжения частотой до 500 Гц по одному/трем каналам и по разностному каналу для поверки и калибровки амплитудных и пиковых вольтметров.

Основные технические характеристики прибора:

- диапазон измерения напряжения 0,06 ... 360 В;
- номинальный ток $I_{ном}$ равен 0,1; 0,5; 1; 5; 10; 50; 100; 300; 500; 1000; 3000 А;
- ПКЭ по ГОСТ 13109;
- диапазон рабочих температур: $-20 \dots 50 \text{ }^{\circ}\text{C}$;
- масса прибора 2 кг.

Штатные судовые приборы, ввиду их относительно большой погрешности измерений, использовались только для контроля параметров электрической энергии, результаты которых в расчетах и анализе не использовались.

Измерение параметров электрической энергии работающих ДГА производилось при работе под нагрузкой в характерных режимах. Такими режимами являлись:

- ходовой режим при работе одного ДГА (№ 2);
- маневренный режим при параллельной работе двух ДГА (№ 2 и 3);
- режим дрейфа (стоянка на рейде) при работе одного ДГА (№ 3);
- режим швартовки в порту при параллельной работе двух ДГА (№ 2 и 3);
- режим выгрузки нефтепродуктов своими средствами при параллельной работе двух ДГА: (№ 2 и 3).

ДГА № 1 в работе не использовался и находился в резерве.

Продолжительность измерения для ходового, маневренного режимов и режима дрейфа составляла не менее 24 ч с тридцатиминутным усреднением. Для режимов швартовки и выгрузки продолжительность измерений составила около двух часов с 3-секундным усреднением для определения максимальных значений мощности ДГА. Измерения параметров электрической нагрузки электроприводов на 0,45 кВт проводились только на работающем в момент обследования оборудовании. Режим измерения выбирался кратковременный с усреднением 3 с или 1 мин. Перечень электроприводов, на которых производились измерения, выбирался из таблицы нагрузок судовой электростанции.

Измерения электрических параметров и ПКЭ проводились без отклонения нагрузки и разрыва электрических цепей с применением гибких токовых клещей (0 ... 300 А; 0 ... 3000 А) и проводов с зажимами типа «крокодил» для измерения напряжения. Схема подключения прибора при измерении в сети 0,45 кВт (в общем виде) показана на рис. 3.

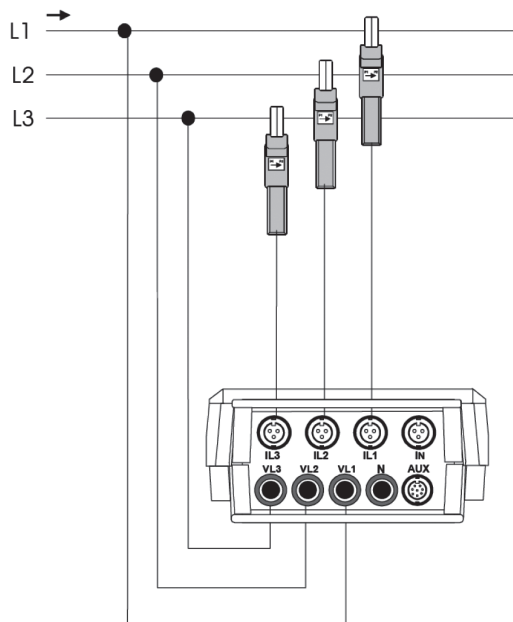


Рис. 3. Схема подключения переносного прибора «Энерготестер ПКЭ-06»

Непосредственное подключение приборов осуществлялось на отходящих фидерах главного распределительного щита (ГРЩ) (для ДГА и наиболее важных электроприводов) или на местных постах в станциях управления электроприводами. Все результаты измерений оформлялись в табличной форме в виде соответствующих протоколов.

По результатам измерений были выполнены графики изменения активной, реактивной мощности и коэффициента мощности во времени работающих ДГА. Полученные результаты сравни-

вались с паспортными данными ДГА и соответствующими допустимыми значениями параметров. Результаты сравнения были проанализированы и сделан вывод о качестве электроэнергии.

Результаты измерений для электроприводов (ЭП) в дальнейшем использованы для расчётов коэффициента нагрузки электродвигателя ($K_{нагр}$). Выполненные расчёты позволяют сделать вывод о правильности выбора мощности электродвигателя для привода, оценить потери и сделать предложения по их снижению (это в том случае, если электродвигатели выбраны неправильно, имеют низкий коэффициент нагрузки менее 50 % и, соответственно, повышенные потери), что непосредственно отразится на уменьшении удельного расхода топлива ДГА [4] – [6].

Результаты измерений

При измерениях в ходовом режиме использовался ДГА № 2. Обобщённые результаты измерений электрических параметров, выполненные в течение суток, представлены в табл. 1.

Таблица 1

Обобщённые результаты измерения электрических параметров ДГА № 2 в ходовом режиме

Электрические параметры	f , Гц	I_A , А	I_B , А	I_C , А	U_{AB} , В	U_{BC} , В	U_{CA} , В	$\cos \varphi$, о.е.	S_Σ , кВ·А	P_Σ , кВт	Q_Σ , кВ·А	$K_{нагр}$, о.е.
ДГА № 2 ($P = 750$ кВт)												
Максимальные значения	60,05	813,67	813,37	798,09	445,89	446,25	446,15	0,84	620,17	519,25	338,98	0,69
Минимальные значения	59,89	678,00	675,67	663,08	444,26	444,37	444,37	0,82	517,95	430,86	286,81	0,52
Средние значения	59,99	729,53	728,55	713,59	445,13	445,36	445,21	0,83	556,41	460,33	310,67	0,62

По результатам измерений построены графики изменения активной, реактивной мощности и $\cos \varphi$, которые представлены на рис. 4.

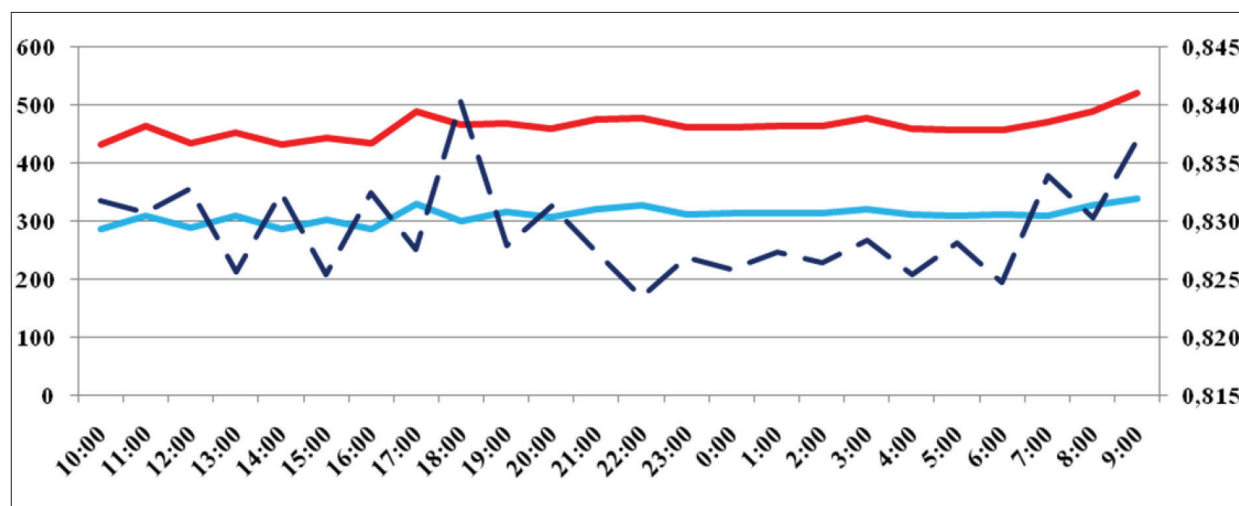


Рис. 4. Активная (P), реактивная (Q) мощности и коэффициент мощности $\cos \varphi$ ДГА № 2 в ходовом режиме:
 P_Σ , кВт — красная линия; Q_Σ , кВ·А — голубая линия; $\cos \varphi$ — пунктирная линия

Из анализа табл. 1 и графиков на рис. 4 можно сделать вывод о том, что активная нагрузка ДГА в ходовом режиме изменялась от 430 кВт до 519 кВт и в среднем составила 460 кВт. При этом $\cos \varphi$ находился в пределах 0,82 – 0,84, а коэффициент электрической нагрузки изменялся от 0,52 до 0,69 и в среднем составил 0,62, что указывает на вполне допустимое использование одного ДГА установленной номинальной активной мощности 750 кВт в ходовом режиме.

В процессе проведения исследований ДГА № 3 использовался для питания судовой электро-энергетической установки в режиме стоянки на рейде.

Из анализа полученных результатов измерений и соответствующих графиков можно сделать вывод, что активная нагрузка ДГА № 3 в режиме дрейфа изменялась в пределах 386 ... 444 кВт и в среднем составила 420 кВт. При этом $\cos \varphi$ находился в пределах 0,79 – 0,84, а коэффициент нагрузки изменялся от 0,51 до 0,59 и в среднем составил 0,56, что указывает на допустимое использование одного ДГА установленной номинальной активной мощности 750 кВт в режиме дрейфа.

ДГА № 2 и 3 использовались для параллельной работы в маневренном режиме.

По данным измерения электрических параметров при параллельной работе ДГА № 2 и 3, обобщенные результаты которых представлены в табл. 2, построенные графики изменения активной, реактивной нагрузки и $\cos \varphi$ обоих ДГА приведены на рис. 5.

Таблица 2

**Обобщённые результаты измерения электрических параметров ДГА № 2 и 3
при их совместной работе (параллельной) в маневренном режиме**

Электрические параметры	f , Гц	I_A , А	I_B , А	I_C , А	U_{AB} , В	U_{BC} , В	U_{CA} , В	$\cos \varphi$, о.е.	S_{Σ} , кВт·А	P_{Σ} , кВт	Q_{Σ} , кВт·А	$K_{нагр}$, о.е.
ДГА № 2 ($P = 750$ кВт)												
Максимальные значения	60	406	407	410	450	450	450	0,79	318	249	198	
Минимальные значения	60	347	346	349	449	449	449	0,76	271	211	167	
Средние значения	60	373	372	375	450	450	450	0,77	291	225	185	
ДГА № 3 ($P = 750$ кВт)												
Максимальные значения	60	371	374	373	450	450	450	0,82	290	229	178	
Минимальные значения	60	310	310	310	449	449	449	0,78	242	195	143	
Средние значения	60	335	335	336	450	450	450	0,80	261	208	158	

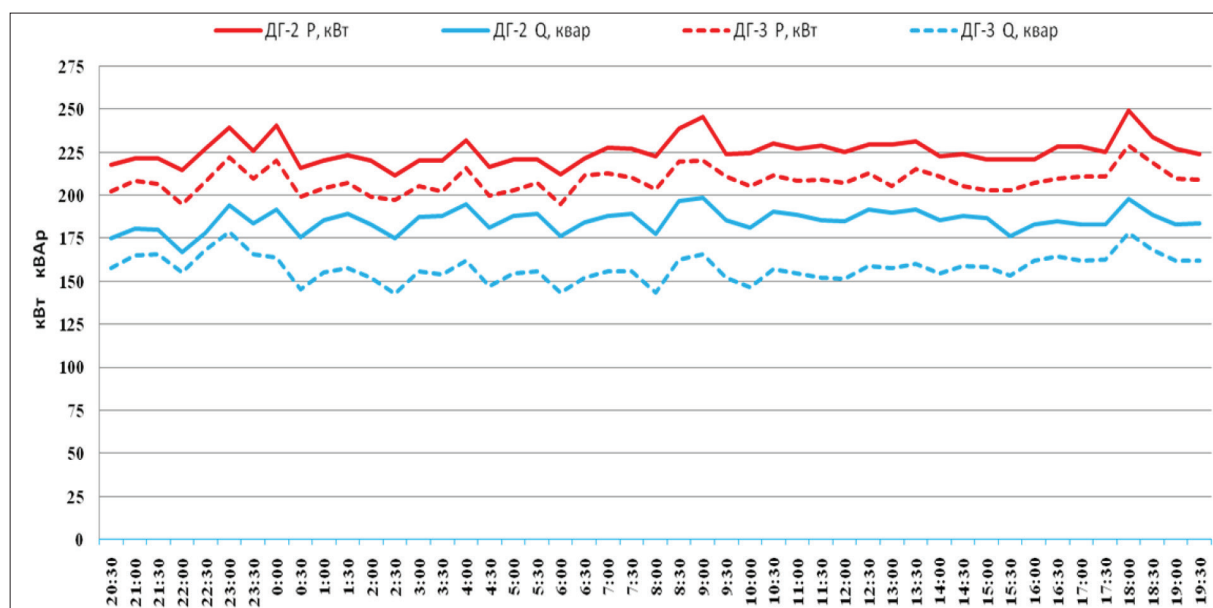


Рис. 5. Активная (P), реактивная (Q) мощности ДГА № 2 и 3 в маневренном режиме

Анализ полученных данных по распределению активной и реактивной мощности параллельно работающих ДГА № 2 и 3 указывает на то, что максимальная неравномерность распределения активной мощности составляет 5,42 % (при норме 15 %) от мощности генераторов, что соответствует требованиям Международной электротехнической комиссии.

Суммарная активная нагрузка двух ДГА в маневренном режиме изменялась от 406 кВт до 478 кВт и в среднем составила 433 кВт, что составляет 28,9 % от суммарной номинальной мощности ДГА. При этом $\cos \varphi$ находился в пределах 0,76 – 0,82, а коэффициент нагрузки изменялся от 0,27 до 0,32 и в среднем составил 0,29, что указывает, как и следовало предполагать в соответствии с требованиями Правил Российского морского регистра судоходства, на низкую эффективность использования установленной мощности двух ДГА в маневренном режиме.

Во время энергетического обследования были измерены основные показатели качества электроэнергии и в цепях питания судовых приемников электроэнергии — асинхронных электродвигателей. В табл. 3 приведены показатели качества электроэнергии (в том числе и для изменения тока $K_I = \frac{(I - I_n)}{I_n} \cdot 100 \%$) наиболее мощных электроприводов.

Таблица 3

Показатели качества электроэнергии в цепях приемников

Объект измерения	P_n , кВт	Значения параметров	df , %	dU , %	$K_{U_{AB}}$, %	$K_{U_{BC}}$, %	$K_{U_{CA}}$, %	K_{I_A} , %	K_{I_B} , %	K_{I_C} , %	$K_{\text{нар}}$, о. е.
Приёмники электроэнергии											
Электропривод балластного насоса № 1	160	Максимальные значения	–0,15%	0,37%	0,45	0,40	0,40	0,97	0,99	0,84	0,83
		Минимальные значения	–0,48%	0,04%	0,43	0,38	0,39	0,91	0,93	0,79	0,82
		Средние значения	–0,25%	0,30%	0,45	0,40	0,40	0,94	0,97	0,82	0,83
Электропривод балластного насоса № 2	315	Максимальные значения	–0,08%	0,52%	0,47	0,42	0,42	0,54	0,53	0,43	0,91
		Минимальные значения	–0,38%	0,26%	0,46	0,41	0,41	0,51	0,50	0,40	0,89
		Средние значения	–0,13%	0,49%	0,46	0,41	0,41	0,52	0,51	0,41	0,90
Электропривод вентилятора инертных газов	126	Максимальные значения	–0,11%	1,76%	0,59	0,54	0,55	2,30	2,27	2,17	1,25
		Минимальные значения	–0,55%	1,47%	0,51	0,44	0,46	1,35	1,45	1,36	0,39
		Средние значения	–0,34%	1,63%	0,54	0,47	0,49	1,64	1,71	1,60	0,83

Как видно из данных, представленных в табл. 3, а также из результатов обследования ЭП ни один из показателей качества электроэнергии не отклоняется за допустимые значения.

Вопросы, касающиеся повышения качества электроэнергии, контроля параметров качества электроэнергии в судовых электроэнергетических системах, также рассмотрены в работах [7] – [11].

Выводы

1. С использованием двух приборов «Энерготестер ПКЭ-06» отечественного производства фирмы «Марс-Энерго» по разработанной методике произведена оценка качества энергии в электрических цепях работающих синхронных генераторов и приемников электроэнергии.

2. Анализ показателей качества электроэнергии по их измеренным значениям и графическим зависимостям от времени показал, что качество электроэнергии в системе электроснабжения танкера соответствует требованиям Международной электротехнической комиссии и Российского морского регистра судоходства.

3. Дальнейшие исследования следует направить на оптимизацию электрической нагрузки синхронных генераторов с целью уменьшения удельного расхода топлива дизель-генератора.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Правила классификации и постройки морских судов. — Ч. 2. — СПб.: Изд-во РМРС, 2015. — 807 с.
2. Шейнихович В. В. Качество электроэнергии на судах / В. В. Шейнихович, [и др.]. — Л.: Судостроение, 2004. — 160 с.
3. Сафонов Д. Г. Анализ основных характеристик современных средств измерения показателей качества электроэнергии / Д. Г. Сафонов, К. Х. Тураханов // Омский научный вестник. — 2010. — № 1 (87). — С. 144–149.
4. Кузнецов С. Е. Потери и коэффициент полезного действия судового синхронного генератора / С. Е. Кузнецов // Эксплуатация морского транспорта. — 2009. — № 3. — С. 67–71.
5. Кузнецов С. Е. Влияние нагрузки и коэффициента мощности на расход топлива судового дизель-генераторного агрегата / С. Е. Кузнецов, Ю. В. Кудрявцев // Судостроение. — 2011. — № 6. — С. 30–32.
6. Виноградов А. А. Удельный расход топлива судового дизель-генераторного агрегата / А. А. Виноградов, С. Е. Кузнецов // Тезисы докладов V МНК «Морская техника и технологии. Безопасность морской индустрии», 21 – 27 мая 2017. — Калининград: КГТУ, 2017. — С. 141–143.
7. Романовский В. В. Качество электроэнергии гребных электрических установок судов ледового плавания и ледоколов / В. В. Романовский, А. И. Лебедев, А. Г. Гостев // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2014. — № 6 (28). — С. 56–60.
8. Родимов Н. В. Анализ систем повышения качества электрической энергии при активной фильтрации гармонических искажений сети / Н. В. Родимов // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2015. — № 2 (30). — С. 198–207.
9. Потапов А. И. Контроль, диагностика, обеспечение качества электроэнергии / А. И. Потапов, А. А. Пугачёв, И. А. Потапов. — СПб.: Изд-во ДЕАН, 2014. — 840 с.
10. Гриб О. Г. Актуальные задачи определения долевого участия в ответственности за нарушение качества электрической энергии / О. Г. Гриб, Г. А. Сендерович, П. Г. Щербакова // Наукові праці Донецького національного технічного університету. Серія: Електротехніка і енергетика. — 2013. — № 1 (14). — С. 77–82.
11. Берлад Н. В. Повышение качества электроэнергии в судовых электрических сетях / Н. В. Берлад, О. М. Крастелёв, С. А. Татаренко // Водный транспорт. — 2012. — № 1 (13). — С. 57–59.

REFERENCES

1. *Pravila klassifikatsii i postroiki morskikh sudov. Chast' 2*. SPb.: Izd-vo RMRS, 2015.
2. Sheinikhovich, V.V., et al. *Kachestvo elektroenergii na sudakh*. L.: Sudostroenie, 2004.
3. Safonov, D.G., and K.Kh. Turakhanov. "Analiz osnovnykh kharakteristik sovremennykh sredstv izmereniya pokazatelei kachestva elektroenergii." *Omskii nauchnyi vestnik* 1(87) (2010): 144–149.
4. Kuznetsov, S. E. "Poteri i koeffitsient poleznogo deistviya sudovogo sinkhronnogo generator." *Ekspluatatsiya morskogo transporta* 3 (2009): 67–71.
5. Kuznetsov, S. E., and Yu. V. Kudryavtsev. "Effect of load and power factor on fuel consumption of marine diesel generator set." *Shipbuilding* 6 (2011): 30–32.
6. Vinogradov, A.A., and S. E. Kuznetsov. "Udel'nyi raskhod topliva sudovogo dizel'-generatornogo agregata." *Tezisy dokladov V MNK «Morskaya tekhnika i tekhnologii. Bezopasnost' morskoi industrii», 21-27 maya 2017*. Kaliningrad: KGTU, 2017: 141–143.
7. Romanovsky, V.V., A.I. Lebedev, and A.G. Gostev. "Electricity quality of rowing electrical installations of ice ships and icebreakers." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova* 6(28) (2014): 56–60.

8. Rodimov, N.V. "Analysis of improving the quality of electrical energy at active filtering of harmonic distortion of network." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova* 2(30) (2015): 198–207.

9. Potapov, A.I., A.A. Pugachev, and I.A. Potapov. *Kontrol', diagnostika, obespechenie kachestva elektroenergii*. SPb.: Izd-vo DEAN, 2014.

10. Gryb, O., G. Senderovich, and P. Shcherbakova. "Actual Tasks of Definition Individual Share Responsibility for Power Quality Violation." *Naukovi pratsi Donets'kogo natsional'nogo tekhnichnogo universitetu. Seriya: Elektrotekhnika i energetika* 1(14) (2013): 77–82.

11. Berlad, N.V., O.M. Krastelev, and S.A. Tatarenko. "Povyshenie kachestva elektroenergii v sudovykh elektricheskikh setyakh." *Vodnyi transport* 1(13) (2012): 57–59.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Кузнецов Сергей Емельянович —

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

Кудрявцев Юрий Викторович —

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

Виноградов Андрей Александрович —

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

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Kuznetsov, Sergey Ye. —

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: kuznecovse@gumrf.ru

Kudryavtsev, Yurii V. —

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

Vinogradov, Andrei A. —

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

Статья поступила в редакцию 15 ноября 2017 г.

Received: November 15, 2017.

ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И АВТОМАТИЗАЦИЯ НА ТРАНСПОРТЕ

DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-6-1330-1337

FUZZY MODEL OF THE TYPE OF PROFESSIONAL ACTIVITY BY UNIVERSITY GRADUATES CHOICE

S. D. Aysinov, A. E. Sazonov, M. B. Solodovnicheko

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

Development of recommendations on professional activities choosing for the graduates of Radio Engineering speciality, based on fuzzy model is considered. The “indistinct” model allows to concretize the hardly formalizable indicators defining ability of the graduate to a concrete kind of activity. The model considers also the main requirements to university graduates according to the existing state educational standards, and extent of development by graduates of the studied disciplines.

Assessment of the levels of specific competences of graduates according to major groups of disciplines is formed. Requirements for different groups of subjects depending on the future professional activity of graduates are developed. Tables in which requirements to the level of knowledge depending on professional activity and potential abilities of graduates to different types of activity are developed. Tables are developed on the basis of the expert estimates considering experience of experts in different types of activity.

With the use of the made matrix through method of min-max composition the type of activity adequate to the ability and enthusiasm of graduate is determined. The example of use of the made model for development of recommendations about the choice of a type of professional activity for graduates of radio engineering specialty of the admiral S. O. Makarov State university of the Sea and River Fleet is given. In the example taken into account the requirements of applicable Federal state educational standard of higher education 25.05.03 “Technical operation of transport radio equipment” (level specialties).

Keywords: fuzzy model, professional activity of graduates, the evaluation of the level of competence, binary relations, minimax criteria, the level of knowledge, competence matrix, a type of professional activity, recommendations for choosing career.

For citation:

Aysinov, Sergey D., Anatoly E. Sazonov, and Michail B. Solodovnichenko. “Fuzzy model of the type of professional activity by university graduates choice.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova* 9.6 (2017): 1330–1337. DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-6-1330-1337.

УДК681.3

РАЗРАБОТКА НЕЧЕТКОЙ МОДЕЛИ ВЫБОРА ВИДА ПРОФЕССИОНАЛЬНОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ ВЫПУСКНИКАМИ ВУЗА

С. Д. Айзинов, А. Е. Сазонов, М. Б. Солодовниченко

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

Разработана модель на основе теории нечетких множеств, позволяющая выработать рекомендации по выбору вида профессиональной деятельности выпускников вуза. «Нечеткая» модель позволяет конкретизировать трудно формализуемые показатели, определяющие способность выпускника к конкретному виду деятельности. Модель учитывает также основные требования к выпускникам вуза в соответствии с существующими государственными образовательными стандартами и степень освоения выпускниками изучаемых дисциплин. Формируется оценка уровней компетентностей конкретных выпускников по основным группам изучаемых дисциплин. Разработаны требования к различным группам

дисциплин в зависимости от будущей профессиональной деятельности выпускника. Составлены таблицы, в которых определены требования к уровню знаний в зависимости от профессиональной деятельности и потенциальных способностей выпускников к различным видам деятельности. Таблицы разработаны на основе экспертных оценок, учитывающих опыт работы специалистов в различных видах деятельности.

В соответствии с указанными требованиями составлены матрицы, определяющие степень соответствия требований к различным видам профессиональной деятельности выпускника уровню освоения различных дисциплин. С использованием составленных матриц методом минимаксной композиции определяется вид деятельности, адекватный соотношению степени компетенций выпускника требованиям, установленным к этому виду деятельности. На основании полученных соотношений разработана методика, определяющая рекомендации по виду дальнейшей профессиональной деятельности выпускников. Приведен пример использования составленной модели для выработки рекомендаций по выбору вида профессиональной деятельности для выпускников радиотехнической специальности Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова на основании действующего Федерального государственного общеобразовательного стандарта высшего образования 25.05.03 «Техническая эксплуатация транспортного радиооборудования» (уровень специалитета).

Ключевые слова: нечеткая модель, профессиональная деятельность выпускников, оценка уровня компетентности, бинарные отношения, минимаксный критерий, уровень знаний, матрица компетентностей, вид профессиональной деятельности, рекомендации по выбору деятельности.

Для цитирования:

Айзинов С. Д. Разработка нечеткой модели выбора вида профессиональной деятельности выпускниками вуза / С. Д. Айзинов, А. Е. Сазонов, М. Б. Солодовниченко // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2017. — Т. 9. — № 6. — С. 1330–1337. DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-6-1330-1337.

Введение

Перед выпускником любого вуза всегда стоит задача выбора вида дальнейшей профессиональной деятельности, которая бы максимально соответствовала его знаниям и потребностям. Возможности выпускника зависят от уровня его знаний, состояния здоровья и характера. Действующими государственными образовательными стандартами высшего образования предусмотрены различные виды профессиональной деятельности (эксплуатационно-техническая, организационно-управленческая, проектно-конструкторская и др.). Абстрактный выбор вида будущей профессиональной деятельности выпускника, не учитывающий его реальные способности, может привести к тому, что желания выпускника не совпадают с его возможностями. В свою очередь, игнорирование потенциальных способностей выпускника может привести к его разочарованию в выбранном виде профессиональной деятельности.

Вследствие этого зачастую в дальнейшем у выпускников замедляется карьерный рост из-за несоответствия выбранного вида деятельности их способностям и возможностям. Поэтому очень важно своевременно определить наиболее подходящий для выпускника вид профессиональной деятельности. Эти рекомендации могут разработать только преподаватели и другие сотрудники факультета, которые общаются с курсантами на протяжении всего процесса обучения. Государственным стандартом высшего профессионального образования предусмотрена подготовка студентов вуза к различным видам деятельности. Актуальной является задача выбора выпускником вуза такой деятельности, в которой он окажется наиболее успешным. Выбор должен основываться на различных характеристиках выпускника. Целевая функция по оптимальному выбору вида профессиональной деятельности является многокритериальной и трудноформализуемой. Для решения таких задач эффективным оказывается математический аппарат теории нечетких множеств [1] – [3]. Теория нечетких множеств широко используется для оптимизации выбора решений в различных областях науки и техники [4] – [7]. Она используется также для повышения эффективности учебного процесса [8] – [10].

В статье разработана нечеткая модель формирования рекомендаций выпускнику по выбору вида профессиональной деятельности на основе оценки его знаний. Эффективность работы спе-

специалиста определяется также и другими факторами, такими как здоровье, черты характера и др. Однако получение подобной информации требует привлечения специалистов других категорий: врачей, психологов, и в данной статье не учитывается.

Предлагаемая модель является инструментом для преподавателей, которые на основании экспертных оценок смогут выработать обоснованные рекомендации для выпускника вуза.

Методы и материалы

Основой для формирования модели являются следующие два бинарные нечеткие отношения:

- требования к уровню знаний выпускников по группам основных дисциплин в зависимости от вида их дальнейшей профессиональной деятельности (N);
- оценка уровня знаний конкретных выпускников по основным группам изучаемых дисциплин (K).

Первое нечеткое отношение (N) должно формироваться на основе следующих двух базисных множеств:

- перечень видов будущей профессиональной деятельности выпускников (x);
- перечень групп дисциплин, оценка уровня знаний выпускников, которые будут служить критериями для принятия рекомендаций (y).

Второе нечеткое отношение (K) должно формироваться на основе двух следующих базисных множеств:

- перечень групп дисциплин, по которым оценка уровня знаний выпускников будет служить критерием для принятия решения (y);
- список выпускников (z):

$$X = (x_1, x_2, \dots, x_k);$$

$$Y = (y_1, y_2, \dots, y_l);$$

$$Z = (z_1, z_2, \dots, z_n).$$

Бинарные нечеткие отношения N и K , заданные на декартовых произведениях универсумов X , Y и Z ($X \times Y$) и ($Y \times Z$), будут иметь следующий вид:

$$N = \{ \langle x, y \rangle, \mu_N(\langle x, y \rangle) \};$$

$$K = \{ \langle y, z \rangle, \mu_K(\langle y, z \rangle) \},$$

где μ — функция принадлежности каждого элементарного бинарного отношения.

Для получения окончательных рекомендаций каждому выпускнику по выбору вида его профессиональной деятельности воспользуемся нечеткой композицией двух исходных нечетких бинарных отношений N и Z , заданных на декартовом произведении $N \times Z$.

Такая композиция двух нечетких бинарных отношений имеет также название «max-min-композиция».

Функция принадлежности μ этого нечеткого бинарного отношения $N \times Z$ будет определяться по формуле

$$\mu_{N \times Z}(\langle x, z \rangle) = \max \{ \min \{ (\mu_N(\langle x, y \rangle), \mu_K(\langle y, z \rangle)) \} \}.$$

Результаты

Рассмотрим решение задачи на примере формирования рекомендаций для выпускников радиотехнической специальности Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова.

Матрица требований к уровню знаний в зависимости от вида деятельности

Первоначально сформируем таблицу и матрицу нечеткого отношения N , которые будут характеризовать требования к уровню знаний выпускников по основным дисциплинам в зависимости от вида их профессиональной деятельности.

Для этого потребуется создать два следующих базисных множества.

1. Перечень групп изучаемых дисциплин, по которым должен быть определен уровень знаний каждого выпускника.

2. Перечень видов будущей профессиональной деятельности выпускников.

Экспертами предложено все дисциплины сгруппировать в следующие основные группы:

– математика и естественно-научные дисциплины — y_1 ;

– техническая эксплуатация средств радиосвязи, электрорадионавигации, радиолокации и телекоммуникационных систем — y_2 ;

– вычислительная техника, автоматика и информационные технологии — y_3 ;

– профессиональный английский язык — y_4 ;

– экономика и управление производством — y_5 .

Экспертами определены следующие основные виды профессиональной деятельности, включенные в Госстандарт по специальности:

– эксплуатационно-техническая — x_1 ;

– организационно-управленческая — x_2 ;

– производственно-технологическая — x_3 ;

– проектно-конструкторская — x_4 .

Количественная оценка функций принадлежности нечетких отношений пар элементов базисных множеств X и Y также определяется экспертами, установившими следующие количественные значения функций принадлежности элементов нечеткого отношения N (табл. 1).

Таблица 1

**Нечеткое отношение N требований по выбору
вида производственной деятельности выпускников**

Вид производственной деятельности	Математика и естественно-научные дисциплины	Техническая эксплуатация средств радиосвязи, электро-радионавигации	Вычислительная техника, автоматика, информационные технологии	Экономика и управление производством	Профессиональный английский язык
Эксплуатационно-техническая	0,6	0,9	0,7	0,5	0,8
Организационно-управленческая	0,5	0,5	0,8	0,9	0,7
Производственно-технологическая	0,7	0,8	0,7	0,7	0,6
Проектно-конструкторская	0,8	0,6	0,9	0,6	0,7

Матрица нечеткого отношения N будет иметь следующий вид:

$$M_N = \begin{bmatrix} 0,6 & 0,9 & 0,7 & 0,5 & 0,8 \\ 0,5 & 0,5 & 0,8 & 0,9 & 0,7 \\ 0,7 & 0,8 & 0,7 & 0,7 & 0,6 \\ 0,8 & 0,6 & 0,9 & 0,6 & 0,7 \end{bmatrix}.$$

Выбор вида профессиональной деятельности

Рассмотрим применение предложенной методики на условном примере. Для этого следует составить таблицу и матрицу нечеткого отношения K , характеризующего уровень знаний выпускников по группам дисциплин. С этой целью необходимо дополнительно составить еще одно базисное множество Z , включающее перечень фамилий выпускников, указанных в табл. 2 (базисное множество Y перечня дисциплин было составлено на предыдущем этапе).

Таблица 2

Нечеткие отношения K оценки уровня знаний выпускников по группам дисциплин

Группы дисциплин	Петров	Иванов	Петренко	Сидоров	Иваненко
Математика и естественно-научные дисциплины	0,8	0,5	0,7	0,8	0,6
Техническая эксплуатация средств радиосвязи и электрорадионавигации	0,5	0,8	0,7	0,5	0,4
Вычислительная техника, автоматика, информационные технологии	0,7	0,6	0,6	0,9	0,5
Экономика и управление производством	0,7	0,7	0,8	0,8	0,7
Профессиональный английский язык	0,8	0,8	0,8	0,7	0,6

Матрица нечеткого отношения K будет иметь вид

$$M_K = \begin{pmatrix} 0,8 & 0,5 & 0,7 & 0,8 & 0,6 \\ 0,5 & 0,8 & 0,7 & 0,5 & 0,4 \\ 0,7 & 0,6 & 0,6 & 0,9 & 0,5 \\ 0,7 & 0,7 & 0,8 & 0,8 & 0,7 \\ 0,8 & 0,8 & 0,8 & 0,7 & 0,6 \end{pmatrix}.$$

Используя композицию двух бинарных нечетких отношений X и K (она также известна как «(min-max-композиция)»), последовательно определим все значения ее функций принадлежности. Для примера приведем расчет функции принадлежности $\mu_{N \times Z} \langle x_1, z_1 \rangle$. С этой целью определим все минимальные значения функций принадлежности всех пар элементов первой строки табл. 1 и первого столбца табл. 2:

$$\mu_{N \times K} \langle x_1, z_1 \rangle = \min(0,6, 0,8), \min(0,9, 0,5), \min(0,7, 0,7), \min(0,8, 0,7), \min(0,8, 0,8).$$

Из выбранных минимальных значений функций принадлежности $\mu_{N \times Z} \langle x_1, z_1 \rangle$ необходимо выбрать ее максимальное значение:

$$\mu_{N \times K} \langle x_1, z_1 \rangle = \max(0,6, 0,5, 0,7, 0,5, 0,8) = 0,8;$$

$$\mu_{N \times K} \langle x_2, z_1 \rangle = \min(0,5, 0,8), \min(0,5, 0,5), \min(0,8, 0,7), \min(0,9, 0,7), \min(0,7, 0,8);$$

$$\mu_{N \times K} \langle x_2, z_1 \rangle = \max(0,5, 0,5, 0,7, 0,7, 0,7) = 0,7;$$

$$\mu_{N \times K} \langle x_3, z_1 \rangle = \min(0,7, 0,8), \min(0,8, 0,5), \min(0,7, 0,7), \min(0,7, 0,7), \min(0,6, 0,8);$$

$$\mu_{N \times K} \langle x_3, z_1 \rangle = \max(0,7, 0,5, 0,7, 0,7, 0,6) = 0,7;$$

$$\mu_{N \times K} \langle x_4, z_1 \rangle = \min(0,8, 0,8), \min(0,6, 0,5), \min(0,9, 0,7), \min(0,6, 0,7), \min(0,7, 0,8);$$

$$\mu_{N \times K} \langle x_4, z_1 \rangle = \max(0,8, 0,5, 0,7, 0,6, 0,7) = 0,8.$$

Остальные функции принадлежности для оценки знаний других выпускников (z_2, z_3, z_4, z_5), определяемые аналогично, приведены в табл. 3.

Таблица 3

Нечеткая композиция двух нечетких отношений N и K , характеризующая возможности выпускников

Вид производственной деятельности	Петров	Иванов	Петренко	Сидоров	Иваненко
Эксплуатационно-техническая	0,8	0,5	0,5	0,8	0,7
Организационно-управленческая	0,7	0,5	0,5	0,8	0,7
Производственно-технологическая	0,7	0,5	0,6	0,7	0,7
Проектно-конструкторская	0,8	0,5	0,6	0,9	0,7

Нечеткая композиция двух нечетких отношений N и K может быть представлена следующей матрицей:

$$\mu_{N \times Z} = \begin{vmatrix} 0,8 & 0,5 & 0,5 & 0,5 & 0,8 \\ 0,7 & 0,5 & 0,5 & 0,8 & 0,7 \\ 0,7 & 0,5 & 0,6 & 0,9 & 0,7 \\ 0,8 & 0,5 & 0,6 & 0,9 & 0,7 \end{vmatrix}.$$

Обсуждение

Анализ табл. 1 и 3 позволяет сформировать рекомендации выпускникам по видам их дальнейшей профессиональной деятельности:

Петрову — выбрать эксплуатационно-техническое или проектно-конструкторское направление;

Иванову — выбрать производственно-технологическое направление;

Петренко — выбрать проектно-конструкторское или производственно-технологическое направление;

Сидорову — выбрать проектно-конструкторское направление;

Иваненко — выбрать проектно-конструкторское или организационно-управленческое направление.

Дополнительно можно привести следующие рекомендации для экспертов.

Для определения уровня знаний выпускников по группам дисциплин в случае отсутствия достаточного количества экспертов представляется целесообразным рекомендовать количественно установить ранг каждой дисциплины, входящей в состав этой группы, с учетом ее влияния на окончательную оценку по всей группе. Для этой цели предлагается использовать формулу Фишберна:

$$K = \frac{2\{(N-p)+1\}}{(N+1)N},$$

где N — число дисциплин в группе;

p — номер ранга.

Количественный расчет ранга следует начинать с дисциплины, имеющей наибольший ранг.

Приведем условный пример использования этой формулы. Предположим, что для i -го выпускника его знания по пяти дисциплинам, входящим в состав группы, распределяются экспертами по рангам в следующем порядке: y_2, y_4, y_5, y_3, y_1 .

Выполнив по формуле количественный расчет рангов, получим их следующие значения:

$$Y_2 = 0,07; Y_4 = 0,3; Y_5 = 0,02; Y_3 = 0,2; Y_1 = 0,1.$$

Заключение

Предлагаемый нечеткий подход для разработки рекомендаций выпускникам по выбору вида их дальнейшей профессиональной деятельности является универсальным инструментом, которым могут воспользоваться руководители факультетов как в процессе обучения курсантов и студентов старших курсов, так и во время подготовки и проведения мероприятий по трудоустройству выпускников.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Дёшина Н. О. Компетентностный подход в высшей школе как необходимое условие повышения качества образования. Актуальные проблемы инфотелекоммуникаций в науке и образовании / Н. О. Дёшина, И. В. Фалина // III Международная научно-техническая и научно-методическая конференция: сб. науч. ст. — 2014. — С. 110–113.

2. Карелин В. П. Модели и методы представления знаний и выработки решений в интеллектуальных информационных системах с нечёткой логикой / В. П. Карелин // Вестник Таганрогского института управления и экономики. — 2014. — № 1 (19). — С. 75–83.
3. Бахусова Е. В. Методы принятия решений на основе нечеткой математики / Е. В. Бахусова // Современные информационные технологии и ИТ-образование. — 2013. — № 9. — С. 371–376.
4. Леоненков А. В. Нечеткое моделирование в среде MATLAB и fuzzy TECH / А. В. Леоненков. — СПб.: БХВ-Петербург, 2003. — 719 с.
5. Смирнова Е. Е. Нечеткая когнитивная модель механизма формирования профессиональных компетенций будущего бакалавра экономики / Е. Е. Смирнова, Е. Н. Надеждин // Информатизация образования и науки. — 2016. — № 1 (29). — С. 175–185.
6. Азарнова Т. В. Повышение эффективности методов управления развитием персонала на основе нейросетевых моделей и нечетких экспертных технологий / Т. В. Азарнова, В. В. Степин, И. Н. Щепина // Вестник Воронежского государственного университета. Серия: Экономика и управление. — 2014. — № 3. — С. 121–130.
7. Данилаев Д. П. Нечеткая модель отбора профилей подготовки технических специалистов / Д. П. Данилаев, Л. Ю. Емалетдинова // Открытое образование. — 2015. — № 4 (111). — С. 28–32.
8. Полетайкин А. Н. Нечеткий подход к оцениванию личностных качеств обучающихся вуза / А. Н. Полетайкин, Т. С. Ильина // ИТпортал. — 2016. — № 4 (12). — С. 2.
9. Сазонов А. Е. Использование метода экспертных отношений предпочтения для оценки уровня совершенства системы управления безопасностью морского судна / А. Е. Сазонов, Г. С. Осипов, В. Д. Клименко // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2013. — № 3 (19). — С. 94–104.
10. Ганина Я. О. Нечеткая продукционная модель для оценки профессиональных качеств морских специалистов / Я. О. Ганина, В. В. Лаптев // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Управление, вычислительная техника и информатика. — 2016. — № 3. — С. 101–108.

REFERENCES

1. Deshina, N. O., and I. V. Falina. "Kompetentnostnyi podkhod v vysshei shkole kak neobkhodimoe uslovie povysheniya kachestva obrazovaniya. Aktual'nye problemy infotelekkommunikatsii v nauke i obrazovanii." *III Mezhdunarodnaya nauchno-tekhnicheskaya i nauchno-metodicheskaya konferentsiya: sbornik nauchnykh statei*. 2014: 110–113.
2. Karelin, V. P. "Modeli i metody predstavleniya znaniy i vyrabotki reshenii v intellektual'nykh informatsionnykh sistemakh s nechetkoi logikoi." *Vestnik Taganrogskego instituta upravleniya i ekonomiki* 1(19) (2014): 75–83.
3. Bakhusova, E.V. "Metody prinyatiya reshenii na osnove nechetkoi matematiki." *Sovremennye informatsionnye tekhnologii i IT-obrazovanie* 9 (2013): 371–376.
4. Leonenkov, A.V. *Nechetkoe modelirovanie v srede MATLAB i fuzzy TECH*. SPb.: BKhV-Peterburg, 2003.
5. Smirnova, Elena E., and Eugene N. Nadeshdin. "Fuzzy cognitive model of professional competences for the future bachelor of economics." *Informatizatsiya obrazovaniya i nauki* 1(29) (2016): 175–185.
6. Azarnova, T. V., V. V. Stepin, and I. N. Shchepina. "Increasing the effectiveness of management methods by personnel development on the basis of neural network models and fuzzy expert technologies." *Proceedings of Voronezh State University. Series: Economics and Management* 3 (2014): 121–130.
7. Danilaev, Dmitry. P., and Lilia. Yu. Emaletdinova. "The fuzzy model of the technical specialist training path selection." *Open Education* 4(111) (2015): 28–32.
8. Poletaykin, A., and T. Il'ina. "Fuzzy assessment techniques of student's personality." *ITportal* 4(12) (2016): 2.
9. Sazonov, A. E., G. S. Osipov, and V. D. Klimenko. "Using expert preference relations to assess the perfection level of ships safety management system." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova* 3(19) (2013): 94–104.
10. Ganina, Yana Olegovna, and Valeriy Victorovich Laptev. "Fuzzy productive model for evaluation of professional qualities of sea experts." *Vestnik of Astrakhan State Technical University. Series: Management, Computer Science and Informatics* 3 (2016): 101–108.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Айзинов Сергей Дмитриевич —

кандидат технических наук

ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала

С. О. Макарова»

198035, Российская Федерация, Санкт-Петербург,

ул. Двинская, 5/7

e-mail: SAysinovMob@mtc.spb.su,

AjzinovSD@gumrf.ru

Сазонов Анатолий Ефимович —

доктор технических наук, профессор

ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала

С. О. Макарова»

198035, Российская Федерация, Санкт-Петербург,

ул. Двинская, 5/7

e-mail: sazonst@yandex.ru, kaf_avt@gumrf.ru

Солодовниченко Михаил Борисович —

кандидат технических наук, профессор

ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала

С. О. Макарова»

198035, Российская Федерация, Санкт-Петербург,

ул. Двинская, 5/7

e-mail: SolodovnichenkoMB@gumrf.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Aysinov, Sergey D. —

PhD

Admiral Makarov State University of Maritime
and Inland Shipping

5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg, 198035,

Russian Federation

e-mail: SAysinovMob@mtc.spb.su,

AjzinovSD@gumrf.ru

Sazonov, Anatoly E. —

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: sazonst@yandex.ru, kaf_avt@gumrf.ru

Solodovnichenko, Michail B. —

PhD, professor

Admiral Makarov State University of Maritime
and Inland Shipping

5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg, 198035,

Russian Federation

e-mail: SolodovnichenkoMB@gumrf.ru

Статья поступила в редакцию 3 октября 2017 г.

Received: October 3, 2017.

METHODOLOGICAL BASES AND SOFTWARE OF SYSTEM OF STRATEGIC MANAGEMENT BY CARGO PORT

A. A. Khanova, E. F. Raykova, I. O. Bondareva

Astrakhan State Technical University, Astrakhan, Russian Federation

The issues of organizing the strategic management of the cargo port are considered. The system of strategic management of a cargo port from the position of the theory of organizational systems is formalized. As the controlled subjects, transshipment processes of cargo transportation, warehousing and auxiliary processes, processes of rendering services are considered. There are three types of cargo port management as an organizational system: institutional, motivational and information management. The objective function of increasing the efficiency of cargo port functioning is described. Formalized strategies to improve the efficiency of the cargo port based on the analysis of profitability, productivity, quality of service, efficiency and economy. The approaches in the field of strategic analysis and risk management of transport and logistics systems are systematized. A balanced system of indicators is proposed as the main tool for improving management effectiveness. A balanced system of indicators was considered in the context of risk assessment, a number of threats were identified: resource-threats, process-threats and result-threats. In the context of strategic, tactical and operational management, the conceptual structure of cargo port management is presented. The proposed cargo port management system involves solving tasks at several levels: developing a strategy, developing a balanced system of indicators, developing a system of functional and cost management, and developing a budgeting system. The scheme of a cargo port management system with a double cycle of control is proposed, which allows to predict the opportunities and threats, the chosen strategy in advance (before its implementation), generate a variant of a balanced system of indicators depending on the strategy, assess the degree of influence of various factors on the functioning of the cargo port when implementing one or another strategies, identify mutually influencing indicators, form managerial decisions, and thus assess the configuration of the strategic management system as a whole. This is achieved by integrating and convergent situational, cognitive, simulation, process, expert models based on the ontological approach. The conceptual structure of a program complex is presented in the form of system of support of acceptance of management decisions on the basis of the offered methodological approaches and a complex of models of cargo port.

Keywords: cargo port, strategic management, management system, risk, model integration, balanced scorecard, strategy.

For citation:

Khanova, Anna A., Elena F. Raykova, and Irina O. Bondareva. "Methodological bases and software of system of strategic management by cargo port." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova* 9.6 (2017): 1338–1353. DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-6-1338-1353.

УДК: 656.078.89

МЕТОДОЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ И ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ СИСТЕМЫ СТРАТЕГИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ ГРУЗОВЫМ ПОРТОМ

А. А. Ханова, Е. Ф. Райкова, И. О. Бондарева

ФГБОУ ВО «Астраханский государственный технический университет»,
Астрахань, Российская Федерация

Рассмотрены вопросы организации стратегического управления грузовым портом. Формализована система стратегического управления грузовым портом с позиции теории организационных систем. В качестве управляемых субъектов рассмотрены перегрузочные процессы транспортировки грузов, складские и вспомогательные процессы, процессы оказания услуг. Выделены три типа управления грузовым портом как организационной системой: институциональное, мотивационное и информационное управление. Описана целевая функция повышения эффективности функционирования грузового порта. Формализованы стратегии повышения эффективности грузового порта на основе анализа прибыльности, производительности, качества обслуживания, действенности и экономичности. Систематизированы подходы в об-

ласти стратегического анализа и управления рисками транспортно-логистических систем. В качестве основного инструмента повышения эффективности управления предложена сбалансированная система показателей. Сбалансированная система показателей рассмотрена в разрезе оценки рисков, выделен ряд угроз: ресурс-угрозы, процесс-угрозы и результат-угрозы. В разрезе стратегического, тактического и оперативного управления представлена концептуальная структура управления грузовым портом. Предлагаемая система управления грузовым портом предполагает решение задач на нескольких уровнях: разработка стратегии, разработка сбалансированной системы показателей, разработка системы функционально-стоимостного управления, разработка системы бюджетирования. Предложена схема системы управления грузовым портом с двойным циклом управления, позволяющая прогнозировать возможности и угрозы, выбранной стратегии заранее (до ее реализации), сгенерировать вариант сбалансированной системы показателей в зависимости от стратегии, оценить степень влияния различных факторов на функционирование грузового порта при реализации той или иной стратегии, выявить взаимовлияющие показатели, сформировать управленческие решения, и, таким образом, оценить конфигурацию системы стратегического управления в целом. Это достигается путем интеграции и конвергенции ситуационной, когнитивной, имитационной, процессной, экспертной моделей на основе онтологического подхода. Представлена концептуальная структура программного комплекса в виде системы поддержки принятия управленческих решений на основе предложенных методологических подходов и комплекса моделей грузового порта.

Ключевые слова: *грузовой порт, стратегическое управление, система управления, риск, интеграция моделей, сбалансированная система показателей, стратегия.*

Для цитирования:

Ханова А. А. Методологические основы и программное обеспечение системы стратегического управления грузовым портом / А. А. Ханова, Е. Ф. Райкова, И. О. Бондарева // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2017. — Т. 9. — № 6. — С. 1338–1353. DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-6-1338-1353.

Введение

Доля российских грузовых портов в мировом грузообороте приближается к 5 %. По грузовому потенциалу морской торговли Россия входит в число шести ведущих стран мира. К 2030 г. планируется увеличение объема грузооборота отечественных морских портов в 1,5 раза, повышение коэффициента использования перегрузочных комплексов до уровня 75 – 80 % и эффективное развитие портовой инфраструктуры. Для повышения эффективности и конкурентоспособности грузового порта даже его оперативные действия должны быть скоординированы и направлены на достижение определенных долгосрочных целей, выраженных в виде показателей, которые зачастую разрознены, не дают полной картины происходящего, не позволяют судить о том, насколько успешно реализуется стратегия порта. Актуальным становится совершенствование механизмов управления грузовыми портами, включающее в себя возможность оценки эффективности достижения стратегических целей на основе набора показателей с использованием современных информационных технологий.

Вопросам исследования грузового порта как организационно-технической системы посвящены работы Ф. Г. Аракелова [1], А. П. Ныркова [2], А. Л. Кузнецова [3], Л. Б. Миротина [4] и др. [5], [6]. В работах В. Н. Буркова [7], Ю. Н. Лапыгина [8], Э. А. Трахтенгерца [9] рассматриваются вопросы стратегического управления сложными системами. Однако следует отметить, что отсутствуют исследования по разработке новых и совершенствованию существующих структур, методов и моделей стратегического управления грузовым портом. Недостаточная изученность научной проблемы создания систем поддержки принятия решений стратегического управления и моделирования применительно к процессам грузового порта обуславливает необходимость проведения научных исследований в этой сфере.

Методы и материалы

Исследование инструментов повышения эффективности организаций развивается по двум основным направлениям: оценка финансовых измерителей в виде систем показателей и формирование комплексных систем, направленных на измерение достижений в различных аспектах дея-

тельности организации. Анализ девятнадцати инструментов повышения эффективности предприятий показал, что Quantum Performance Measurement, Balanced Scorecard и концепция внутреннего рынка «Хьюлетт-Паккард» являются такими наиболее востребованными инструментами. По мнению консалтинговой компании «Bain & Company», проводящей на протяжении более 20 лет ежегодные исследования инструментов повышения эффективности предприятий «Management Tools & Trends», «Balanced Scorecard», сбалансированная система показателей (ССП) является наиболее востребованной.

Стратегическое управление грузовым портом (ГП) по целям на основе сбалансированной системы показателей (ССП) обуславливает необходимость формирования структуры управления в виде причинно-следственных связей между достижением целей, изменениями показателей деятельности, принятием управленческих решений и потреблением ресурсов. Структуру системы стратегического управления ГП представим в виде следующей совокупности (рис. 1):

- управляющего органа (центра), реализующего управление на стратегическом, тактическом и оперативном уровнях;
- управляемых субъектов — процессов оказания услуг (ПОУ) ГП, а именно: перегрузочные процессы (ПП), процессы транспортировки грузов (ПТГ), складские процессы (СкП) и вспомогательные процессы (ВП);
- управляемого объекта (ГП), имеющего на входе управляющие воздействия $y = (y_1, y_2, y_3, y_4) \in A = (A_1, A_2, A_3, A_4)$ и внешние воздействия $\theta \in \Theta$, на выходе — результат деятельности объекта (состояние ГП) $z \in A_0$, который зависит от действия $y \in A$ и обстановки $\theta \in \Theta$ следующим образом: $z = \omega(y, \theta)$. Включение в контур управления обратной связи позволяет организовать предоставление информации о состоянии ГП центру и управляющим субъектам, обеспечивающим процессы оказания услуг.

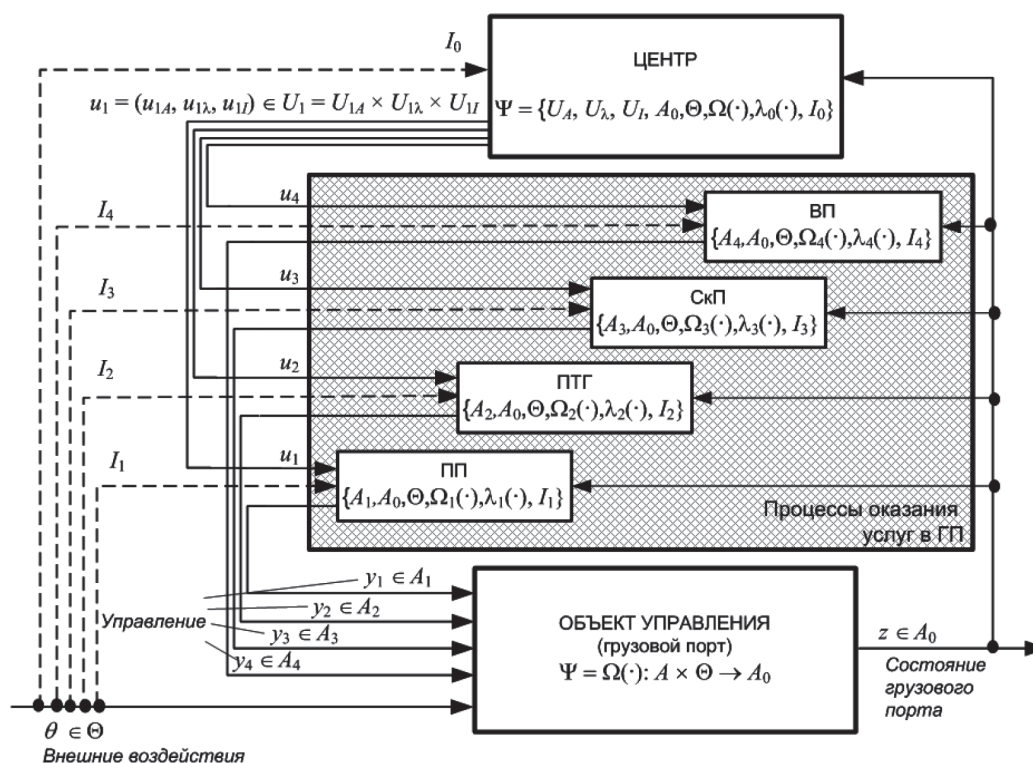


Рис. 1. Структура системы управления грузовым портом

Формализацию процедуры принятия решений управляемыми субъектами ПОУ ГП представим следующим кортежем [7]:

$$\Psi_i = \{A_i, A_0, \Theta, \Omega_i(\cdot), \lambda_i(\cdot), I_i\}, \text{ где } i \in N = \{1, 2, 3, 4\},$$

т. е. в виде следующих множеств: допустимых действий $A = (A_1, A_2, A_3, A_4)$, допустимых результатов деятельности A_0 , значений обстановок (неопределенности) Θ , а также в виде функций полезности $\lambda_1(\cdot), \lambda_2(\cdot), \lambda_3(\cdot), \lambda_4(\cdot)$ для управляемых субъектов ПОУ ГП и взаимосвязи между действиями, обстановкой и результатом деятельности $\Omega_1(\cdot), \Omega_2(\cdot), \Omega_3(\cdot), \Omega_4(\cdot)$ для ПОУ ГП, а также в виде информации $I = (I_1, I_2, I_3, I_4)$, которой обладают управляемые субъекты на момент принятия решений.

Законы $\Omega_1(\cdot), \Omega_2(\cdot), \Omega_3(\cdot), \Omega_4(\cdot)$ должны быть известны всем участникам системы стратегического управления ГП и не подлежат изменению. Такое допущение отвечает регламентированной деятельности управляемых объектов (грузовые фронты, причалы, склады, подъемно-транспортное оборудование и т. д.). Множество возможных обстановок Θ , возникающих при осуществлении деятельности ГП, известно всем участникам системы стратегического управления и фиксировано. Множество возможных обстановок Θ всегда формируют достаточно широким. В каждой возникающей ситуации возможные значения обстановок Θ определяются имеющейся у управляемых субъектов ПОУ ГП информацией [7].

Определим три группы элементов кортежей Y , которые могут изменяться: допустимые множества A и A_0 , функции полезности $\lambda_1(\cdot), \lambda_2(\cdot), \lambda_3(\cdot), \lambda_4(\cdot)$ и информация $I = (I_1, I_2, I_3, I_4)$. Им соответствуют три типа управления организационными системами: институциональное управление (изменение допустимых множеств); мотивационное управление (изменение функции полезности); информационное управление (изменение информации, которую управляемый субъект использует при принятии решений) [7].

Модель принятия решений центром описывается кортежем

$$\Psi_0 = \{U_A, U_\lambda, U_I, A_0, \Theta, \Omega(\cdot), \lambda_0(\cdot), I_0\},$$

где $U_A = (U_{A1}, U_{A2}, U_{A3}, U_{A4})$ — институциональное управление; $U_\lambda = (U_{\lambda1}, U_{\lambda2}, U_{\lambda3}, U_{\lambda4})$ — мотивационное управление; $U_I = (U_{I1}, U_{I2}, U_{I3}, U_{I4})$ — информационное управление; A_0 — множество допустимых результатов деятельности управляемых субъектов; Θ — множество обстановок; $\Omega(\cdot)$ — зависимость результата деятельности от действия и обстановки; $\lambda_0(\cdot)$ — функция полезности; I_0 — информация, которой располагает центр для принятия решений. «Действиями» центра (выбираемыми им стратегиями) являются следующие управления: $u_A = (u_{A1}, u_{A2}, u_{A3}, u_{A4}) \in U_A = (U_{A1}, U_{A2}, U_{A3}, U_{A4})$, $u_\lambda = (u_{\lambda1}, u_{\lambda2}, u_{\lambda3}, u_{\lambda4}) \in U_\lambda = (U_{\lambda1}, U_{\lambda2}, U_{\lambda3}, U_{\lambda4})$, $u_I = (u_{I1}, u_{I2}, u_{I3}, u_{I4}) \in U_I = (U_{I1}, U_{I2}, U_{I3}, U_{I4})$.

«Действия» управляемых субъектов ПОУ ГП называют *стратегиями*: $y_i \in A_i$. Совокупность стратегий $y_{-i} = (y_1, \dots, y_{i-1}, y_{i+1}, \dots, y_4) \in A_{-i} = \prod_{j \neq i} A_j$ определяет обстановку i -го управляемого субъекта ПОУ ГП. Задача стратегического управления ГП формально может быть определена следующим образом: необходимо найти допустимое управление, имеющее приемлемую эффективность $E(u) \rightarrow \max_{u \in U}$ [7].

Эффективность управления $E(u)$, $u \in U$ определяется выбранной стратегией [4]. Интересы и предпочтения участников многоэлементной активной системы «Грузовой порт» — центра и управляемых субъектов — выражаются их целевыми функциями (функциями полезности). Предпочтения центра $\lambda_0(\cdot)$ определены на множестве A_0 возможных результатов деятельности управляемых субъектов, а последние зависят от действий управляемых субъектов и обстановки, поэтому качественное управление заключается в побуждении центром управляемых субъектов к выбору определенных действий [7]. Набор функций полезности управляемых субъектов определяется в виде $u_i: E \times A' \rightarrow \mathbb{R}^1$. Представления управляемых субъектов задаются в виде $\mu_i(\cdot | e_i) \in \Delta(E_{-i})$, $i \in N$.

Правило индивидуального рационального выбора управляемого субъекта заключается в выборе действий, составляющих максимум его целевой функции в зависимости от выбора той или иной стратегии центра. Для описания коллективного поведения управляемых субъектов (ПП, ПТГ, СкП и ВП), входящих в многоэлементную систему «Грузовой порт», недостаточно определить их предпочтения и соответствия рационального индивидуального выбора по отдельно

сти. Необходимо описать модель их совместного поведения, учитывающую взаимовлияние этих субъектов [10]. Рациональная стратегия каждого из управляемых субъектов системы «Грузовой порт» зависит от стратегий других субъектов. Набор таких рациональных стратегий, т. е. устойчивых и прогнозируемых исходов, определяется равновесием Байеса–Нэша. Данное равновесие в игре с неполной информацией определяется как набор стратегий управляемых субъектов вида $\sigma_i : E_i \rightarrow X_i, i \in N$, которые максимизируют соответствующие ожидания полезности:

$$U_i(e_i, \sigma(\cdot), \sigma_{-i}(\cdot)) = \int_{e_{-i} \in E} u_i(e, \sigma_i(e_i), \sigma_{-i}(e_{-i})) \mu_i(e_{-i} | e_i) de_{-i}, i \in N.$$

Целевая функция i -го управляемого субъекта ПОУ ГП может быть представлена как разность между доходом $In_i(y)$ от совместной деятельности и затратами $Ex_i(y, ef_i)$, где ef_i — параметр управления, который зависит от типа управляемого субъекта, т. е. $fe_i(y, ef_i) = In_i(y) - Ex_i(y, ef_i)$, $i \in N$. Для ПП рассматривают основные и производные параметры управления ef_1 .

К основным параметрам относят пропускную способность, количество единиц транспорта и численность рабочих в технологической линии. Производные технологические показатели определяются технологической производительностью единицы оборудования, трудоемкостью перегрузки одной тонны груза, выработкой на одного рабочего и др. К параметрам управления ПТГ ef_2 относятся суммарные простои транспортных средств, тарифы транспортировки, объем перевозок и т. п. Для СП параметрами управления ef_3 являются грузонапряженность склада, загрузка склада, себестоимость переработки, производительность труда складского персонала, использование подъемно-транспортного оборудования за смену и др. Для ВП параметрами управления ef_4 являются безотказность погрузки, вероятность поломки и т. д.

Совокупность процессов оказания услуг ГП показана в виде последовательности и взаимосвязей логистических целепереходов, параметров управления и внешних факторов (блок I на рис. 2). Стратегии, являющиеся структурным элементом сбалансированной системы показателей, могут быть рассмотрены в качестве целевых функций повышения эффективности в функционировании ГП (блок II на рис. 2 и данные таблицы).

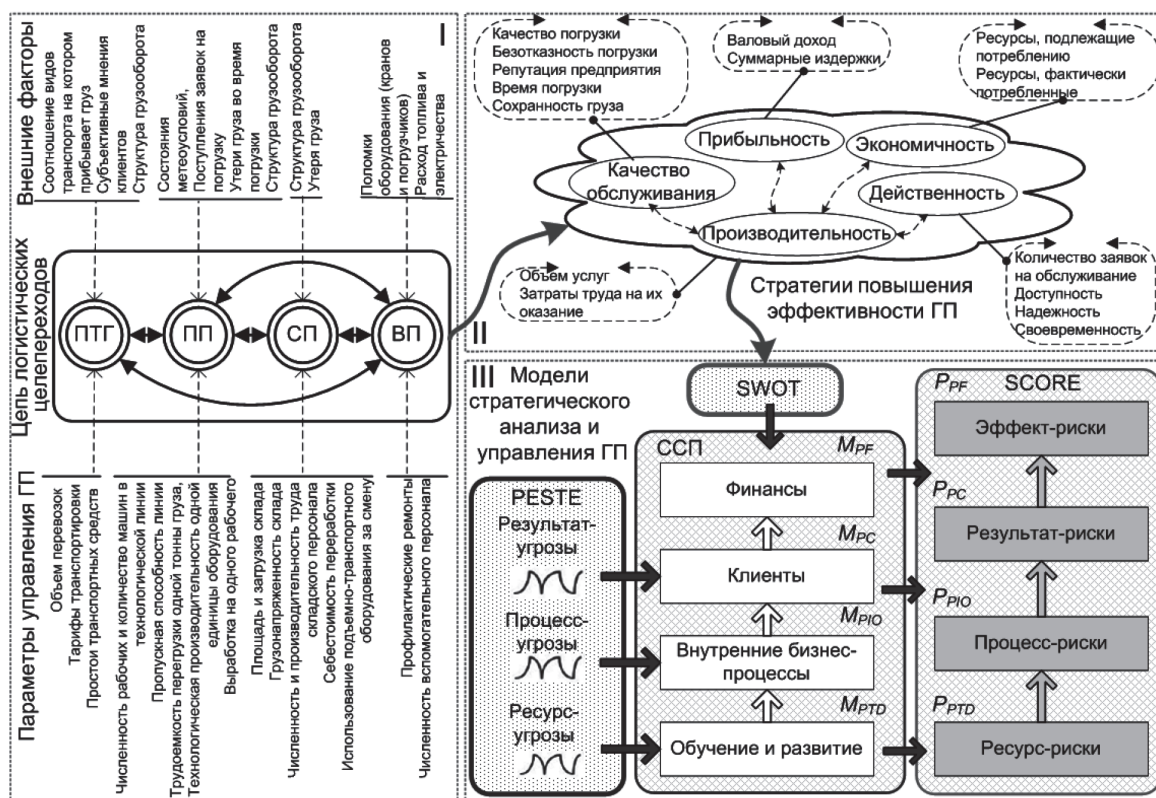


Рис. 2. Соотношение последовательности логистических целепереходов ГП, стратегий и моделей стратегического управления в виде стратегической карты ССП и реестра рисков

Примеры формализации стратегий грузовым портом

Наименование стратегии	Сущность стратегии	Формализация стратегии
Прибыльность	Минимизация логистических затрат (LEx_{ijg}) ГП по i -й операции j -го управляемого субъекта (ПП, ПТГ, СТП, ВП) g -го заказа	$\sum_i^{ni} \sum_j^{nj} \sum_g^{ng} LEx_{ijg} \rightarrow \min$
Производительность	Максимизация объема логистических услуг (Vls_{ijg}) по i -й операции j -го управляемого субъекта (ПП, ПТГ, СТП, ВП) g -го заказа	$\sum_i^{ni} \sum_j^{nj} \sum_g^{ng} Vls_{ijg} \rightarrow \min$
Качество обслуживания	Улучшение качества обслуживания (Qls_{ijg}) i -й операции j -го управляемого субъекта (ПП, ПТГ, СТП, ВП) g -го заказа	$\sum_i^{ni} \sum_j^{nj} \sum_g^{ng} Qls_{ijg} \rightarrow 1$
Действенность	Максимизация действенности (Els_{ijg}) ГП по i -й операции j -го управляемого субъекта (ПП, ПТГ, СТП, ВП) g -го заказа	$\sum_i^{ni} \sum_j^{nj} \sum_g^{ng} Els_{ijg} \rightarrow \max$
Экономичность	Улучшение экономичности ГП (Ek_{ijg}) ГП по i -й операции j -го управляемого субъекта (ПП, ПТГ, СТП, ВП) g -го заказа	$\sum_i^{ni} \sum_j^{nj} \sum_g^{ng} Ek_{ijg} \rightarrow 1$

Примечание. Формализация стратегий грузовым портом осуществляется при следующих ограничениях:
 $\sum_i^{ni} \sum_j^{nj} LEx_{ijg} \leq \sum_i^{ni} R_i$, $\sum_i^{ni} \sum_j^{nj} Vls_{ijg} \leq \sum_i^{ni} Cap_i$, $\sum_i^{ni} \sum_j^{nj} Qls_{ijg} \leq \sum_g^{ng} Qc_g$, где SR_i — суммарные ресурсы грузового порта;
 $SCap_i$ — суммарные возможности грузового порта по выполнению логистических операций; SQc_i — требования клиентов к качеству обслуживания заказов.

Исследование процессов оказания услуг в ГП с точки зрения теории организационных систем позволило раскрыть некоторые требования при разработке программного обеспечения системы поддержки принятия управленческих решений [11], [12]:

1. Создание единой пространственно-временной среды и привязка к ней всех элементов системы, информационных агентов, событий, ситуаций, данных и метаданных.
2. Консолидация и трансформация разнородной информации, полученной из различных источников, с перекрёстным уточнением, добавлением, устранением дубликатов и противоречий.
3. Анализ и прогнозирование развития ситуаций на стратегическом, тактическом и операционном уровне управления.
4. Формирование единой информационно-управляющей среды поддержки принятия решений.

Деятельность ГП определяется наличием сложных, взаимозависимых отношений с флотом, а также другими видами транспорта и предприятиями. Современный этап развития логистики морского транспорта характеризуется ростом грузооборота, повышением конкурентоспособности на рынке стивидорских услуг, увеличением числа разнотипных судов, в том числе специализированных. Организация работы ГП в режиме, который позволил бы обрабатывать суда в минимальные сроки, вел к росту объема оказанных логистических услуг при минимальных суммарных затратах на обработку и содержание судов на стоянке, а также при требуемом уровне качества обслуживания, становится наиболее значительной [13].

Совершенствование управления ГП можно осуществлять либо в направлении строительства новых и перспективного развития действующих портов, либо в условиях существующих на данный момент производственных ресурсов [14]. Первое направление может быть реализовано за счет больших капиталовложений и продолжительных сроков строительства и ввода в эксплуатацию новых объектов. Однако при больших внутренних резервах ГП наиболее приемлема реализация второго направления, а именно: совершенствование управления за счет комплекса организацион-

но-технических мероприятий и небольших капиталовложений, позволяющих в кратчайшие сроки ускорить обработку судов и повысить эффективность логистических процессов [1], [2].

Однако следует иметь в виду, что повышение эффективности влечет за собой увеличение риска [15], [16]. При этом проведение мероприятий, максимально снижающих риск, как правило, приводит к неприемлемому уровню эффективности. Это обуславливает необходимость оценки в процессе управления ГП и эффективности на основе ССП Нортон–Каплана [17] как уровня соответствия результатов деятельности поставленным задачам и рисков как возможности неуспеха этой деятельности [18]. Для оценки рисков в деятельности ГП, в соответствии с моделями PESTE Франциско Эгильера и SCORE Роберта Дилтса, выделены следующие виды угроз: ресурс-угрозы, процесс-угрозы и результат-угрозы [19].

Управление на основе оценки эффективности и риска обуславливает необходимость сопоставления концепции ССП и модели SCORE, описывающей предприятие на временной шкале перехода от имеющегося состояния к желаемому. Перспектива ССП «Отношения с клиентами» в терминах модели SCORE — это результат, перспектива «Обучение и развитие» — ресурс, а перспектива «Бизнес-процессы» — эффективная деловая игра, трансформирующая ресурсы в результаты. Перспектива ССП «Финансы» представляет собой полученный эффект от реализации выбранной стратегии управления ГП.

В рамках модели ССП определяется система взаимосвязанных нормативных значений для показателей (M_{PF} , M_{PC} , M_{PIO} , M_{PTD}) перспектив ССП. Выход значения показателя M за обозначенные пределы означает негатив, возникновение которого свидетельствует о недостижении соответствующей цели в рамках ССП. Каждому показателю M в стратегической карте сопоставлен отдельный риск возникновения негатива, т. е. такого события, когда соответствующий M выйдет за свое нормативное значение (см. блок III на рис. 2).

Матрица угроз модели PESTE представляет собой тематическую иерархию факторов среды: политических, экономических, экологических, технологических и социальных. На основе модели PESTE будем анализировать риск только в отношении отдельной (единичной) угрозы из матрицы угроз. Аналогично стратегической карте ССП сведем все идентифицированные риски в виде реестра рисков. Реестр рисков представляет собой цепочку переходов, соответствующих определению угроз следующего вида: *ресурс-риски* → *процесс-риски* → *результат-риски* → *эффект-риски* (блок III на рис. 2). Таким образом, определена взаимосвязь цепи логистических целепереходов ГП, стратегий повышения эффективности ГП и моделей стратегического управления в виде стратегической карты ССП и реестра рисков (см. рис. 2).

Для повышения конкурентоспособности и эффективности ГП необходимо формирование стратегических целей на долгосрочную перспективу и построение системы управления, обеспечивающей полное согласование стратегических целей и текущих задач, решаемых в различных подразделениях на стратегическом, тактическом и операционном уровнях управления [18]. Система управления ГП по стратегическим целям должна решать последовательность взаимосвязанных задач (рис. 3) разработки: стратегии и ССП, системы функционально-стоимостного управления и системы бюджетирования. Стратегию разрабатывают сотрудники стратегического уровня управления ГП, опираясь на анализ внешней среды — PESTE-анализ, анализ сильных и слабых сторон — SWOT-анализ, анализ рисков — SCORE-анализ (см. блок III на рис. 2).

Построение ССП на первом этапе заключается в определении и выборе стратегических целей, достижение которых обеспечивает реализацию стратегии. Далее для каждой цели ставятся в соответствие ключевые показатели эффективности, позволяющие осуществлять мониторинг в достижении стратегических целей. Следующим этапом является установление причинно-следственных связей между показателями и осуществление проверки ССП на «сбалансированность» по общему количеству показателей, по типам показателей и перспективам, проверка причинно-следственных связей по всей вертикали целей и др. В полученной на стратегическом уровне ССП необходимо каскадировать организационную структуру на тактический и организационный уровни управления. Необходима также

организация взаимодействия управления по долгосрочным стратегическим целям с другими подсистемами управления, а также осуществление контроля ССП [20].



Рис. 3. Система управления грузовым портом по целям

Организация системы функционально-стоимостного управления на тактическом уровне [15] позволяет выявлять условия, обеспечивающие эффективность функционирования ГП, и использовать полученную информацию при принятии управленческих решений. Функционально-стоимостное управление основано на процессном подходе и функционально-стоимостном анализе [21]. В отношении ключевых бизнес-процессов оно позволяет консолидировать контуры финансового планирования и управления. На базе функционально-стоимостного анализа, применяемого к ключевым бизнес-процессам, осуществляется взаимосвязь бюджетов с долгосрочными стратегическими целями ГП.

Система бюджетирования [22] предполагает создание финансовой структуры ГП и системы бюджетных документов, включая алгоритмы расчета показателей. Система бюджетирования обеспечивает управленческий анализ и формирование отчетности. Концептуальная структура управления ГП представляет собой цикл управления (0), включающий последовательность блоков $1 \rightarrow 2 \rightarrow 3 \rightarrow 4 \rightarrow 5 \rightarrow 6 \rightarrow 7 \rightarrow 8$ (соединены контурными стрелками) — рис. 4. Цикл управления (0) предполагает «движение» информации «сверху вниз» и «снизу вверх» [23].

Функционирование цикла управления «сверху вниз» начинается с определения стратегии развития ГП (блок 1 на рис. 4). Детализация стратегии основана на разработке стратегической карты ССП. Далее анализ бизнес-процессов ГП позволяет выявить центры затрат, ресурсов и ограничений, а также осуществить каскадирование целей ССП верхнего уровня в установки (нормы) нижестоящих организационных единиц и выражение целевых установок (норм) в виде конкретных числовых значений показателей ССП (блок 2 на рис. 4).

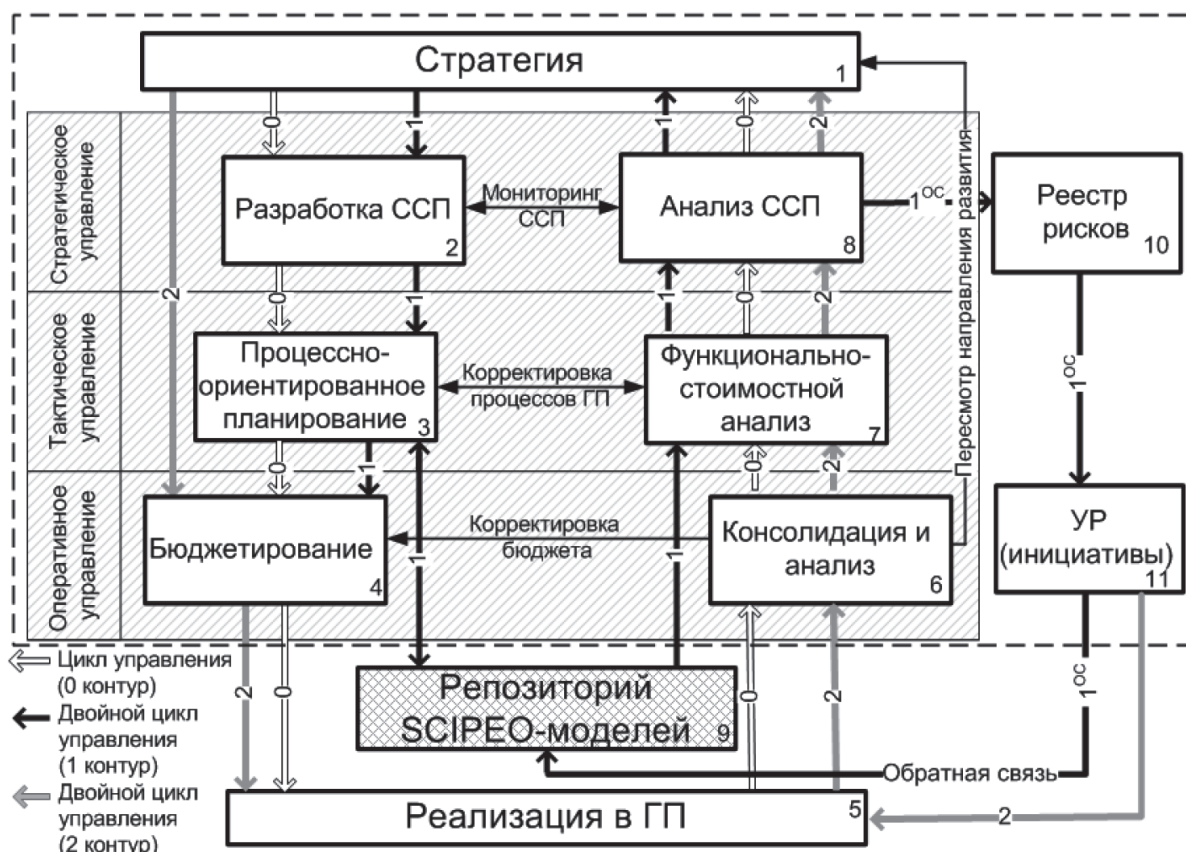


Рис. 4. Концептуальная структура управления ГП

На тактическом уровне управления необходимо процессно-ориентированное планирование (блок 3 на рис. 4), основанное на разработке процессной модели ГП, отражающей последовательность основных бизнес-процессов с последующей их детализацией. Суть процессного подхода состоит в структурировании бизнес-процессов, организации и управлении ими. Объекты системы ГП обладают определенным поведением, находятся в определенных состояниях, могут переходить из одного состояния в другое, совершая определенные действия в процессе выполнения «сценария поведения объекта».

На уровне оперативного управления в блоке 4 на рис. 4 выделяются контрольные точки, для возможности своевременного реагирования на эндо- и экзогенные факторы при осуществлении ПОУ ГП, оказывающие влияние на реализацию стратегии. Необходимо предусмотреть организационные мероприятия в виде приказов по регламенту бюджетирования, бюджетные формы в виде бюджета доходов и расходов, движения денежных средств, системы мотивации, прогнозного баланса и т. п. На этом уровне управления необходима автоматизация процесса бюджетирования.

Все описанные мероприятия должны быть реализованы в ГП (блок 5 на рис. 4). Необходимо осуществлять мониторинг деятельности ГП, отслеживать отклонения показателей ССП от заданных целевых значений, а также прогнозировать тенденции развития ГП. Это дает возможность оценки текущих значений показателей ССП в части достижения определенных целей для реализации рассматриваемой стратегии ССП.

Операции в блоке 6 на рис. 4 выполняются в направлении снизу вверх и включают следующие действия: загрузка данных о деятельности ГП, интеграция и трансформация данных отчетности для внешних и внутренних пользователей в международные стандарты финансовой отчетности, план-фактный анализ, мониторинг выполнения бюджета, оценка состояния бухгалтерского баланса и финансовый анализ.

Блок 7 на рис. 4 предназначен для решения задачи учета и анализа стоимости логистических услуг ГП. Обычно полная себестоимость услуги рассчитывается на основе известных принципов финансовой отчетности (попередельный, нормативный, позаказный, попроцессный методы анализа затрат [15]). Полученная таким образом информация неприменима для выработки управленческих решений. В источнике [21] рассмотрен метод функционально-стоимостного анализа, или учет затрат по функциям (Activity-Based Costing — ABC), для реализации более строгого подхода к отнесению накладных расходов на услугу и к расчету себестоимости. Функционально-стоимостный анализ (ФСА) позволяет получить информацию о себестоимости, влияющей на процессы принятия управленческих решений. В основе ФСА лежит разделение процесса оказания услуг в ГП на отдельные подпроцессы, выделение центров затрат (Cost Drivers) и расчет необходимых ресурсов (временных или финансовых) для каждого из них. Стоимость рассчитанных ресурсов распределяется на логистические услуги по центрам затрат. В результате проведения ФСА определяется оптимальная структура логистического процесса с необходимым и достаточным множеством параметров по стоимости и времени. Состав стратегических целей ГП определяет это множество параметров.

Блок 8 на рис. 4 решает задачу агрегирования информации по показателям стратегической карты ССП, оценки степени риска, синергии и сбалансированности рассматриваемой стратегии и конфигурации ГП.

Цикл управления (0), представленный на рис. 4, содержит блоки $1 \rightarrow 2 \rightarrow 3 \rightarrow 4 \rightarrow 5 \rightarrow 6 \rightarrow 7 \rightarrow 8$ (соединены белыми стрелками) и дает возможность контролировать состояние ГП с учетом осуществления всех мероприятий (блоки 2 – 4), их выполнение в блоке 5 и анализ практических результатов в блоках 6 – 8. Такая организация контура управления исключает оценку возможностей и угрозы выбранной стратегии до ее реализации, степени влияния различных факторов на функционирование грузового порта при реализации стратегии, синтезирование варианта ССП в соответствии со стратегией, выявление взаимовлияющих показателей, разработку управленческих решений и анализ конфигурации системы стратегического управления ГП в целом.

Результаты

Для решения данной проблемы представляется целесообразным изменить цикл управления (см. рис. 4) путем введения контура, позволяющего предварительно сформировав стратегическую карту ССП, оценить реализацию стратегии в различных условиях за счет включения в цикл управления репозитория мультимасштабных SCIPEO-моделей (блок 9 на рис. 4), представляющего интеграцию и конвергенцию ситуационной (S), когнитивной (C), имитационной (I), процессной (P) и экспертной (E) моделей на основе онтологического (O) подхода [23].

Первый контур двойного цикла управления (см. рис. 4) включает выполнение блоков $1 \rightarrow 2 \rightarrow 4 \rightarrow 9 \rightarrow 7 \rightarrow 8 \rightarrow 1$ (соединены черной стрелкой (I)). Функции блоков 1 – 3 и 7 – 8 описаны ранее. Однако процессы формирования ССП, ФСА, синтеза структуры и анализа показателей ССП будут базироваться не на фактической информации о работе ГП, полученной из корпоративной информационной системы, а на данных прогонов имитационной модели и накопленных эмпирических данных, сформированных в результате действия других SCIPEO-моделей. Это позволяет осуществить проверку выбранной стратегии и конфигурации ГП на сжатой временной шкале, оценить и изменить тенденции развития ГП, сделать выводы о возможностях и угрозах с учетом неопределенности воздействия стохастических экзо- и эндогенных факторов, детально изучить влияние этих факторов.

Блок 10 «Реестр рисков» (см. рис. 4) представляет собой перечень выявленных рисков, реализация которых угрожает достижению соответствующих целей и показателей ССП. В бло-

ке II «Управленческие решения (инициативы)» содержится база данных для формирования управленческих решений на выявленные риски. Сформированные управленческие решения можно проверить сначала на имитационной модели, осуществить корректировку бюджета, получить варианты реализации стратегии и далее принимать управленческие решения о выполнении выбранной стратегии на практике, в реальной деятельности ГП. Блоки I0 и II реализуют обратную связь в управлении ГП. Черная стрелка обратной связи I^{0c} декомпозируется на три типа управления: институциональное, мотивационное и информационное.

Второй контур двойного цикла управления (см. рис. 4) включает выполнение блоков $1 \rightarrow 4 \rightarrow 5 \rightarrow 6 \rightarrow 7 \rightarrow 8 \rightarrow 1$ (соединены серой стрелкой (2)) и в целом соответствует описанному ранее циклу управления эффективностью с учетом внедрения в функционирование ГП управленческих решений, выявленных в блоке II.

В терминах теории активных систем [7] двойной цикл управления представляет собой управление Центра (см. рис. 1 и 4) субъектами ПП, ПТГ, СкП и ВП на основе SCPEO-моделей (см. контур 1 на рис. 4) и реализацию УР непосредственно в ГП (см. контур 2 на рис. 4). Механизмы управления центра можно рассматривать по трем уровням: *стратегическое управление* (основано на ССП), *тактическое управление* (основано на функционально-стоимостном управлении) и *оперативное управление* (основано на бюджетировании) — см. рис. 4.

Разработан программный комплекс в виде системы поддержки принятия управленческих решений в соответствии с представленной концептуальной структурой управления ГП. Определим состав семантических подсистем системы поддержки принятия управленческих решений в ГП (рис. 5).



Рис. 5. Логическая структура системы поддержки принятия управленческих решений в грузовом порту

1. Подсистема «Информационная база» представляет собой входную подсистему комплексного формирования первичной информации. В зависимости от типа корпоративной информацион-

ной системы (КИС) она может иметь различную структуру. На схеме представлен один из вариантов структуры КИС ГП.

2. Подсистема «*Управляющие модули*» — центральная подсистема системы поддержки принятия решений, включает совокупность модулей алгоритмическо-математического обеспечения программного комплекса.

3. Подсистема «*Модели ГП*» содержит комплексное мультиаспектное представление предметной области в виде совокупности интегрированных SCIEO-моделей. Совокупность этих моделей формируют экспертно-модельную подсистему программного комплекса.

4. Подсистема «*Программные средства*» характеризует используемый инструментарий и формируют программно-технологическую подсистему, включающую:

- интеллектуальную информационную систему формирования ССП на основе нейронных сетей;

- аналитическую систему поддержки управленческих решений в ГП на основе ССП;

- среду имитационного моделирования Arena — разработан комплекс имитационных моделей, позволяющих выполнять анализ деятельности ГП с различных сторон, включая следующие аспекты: складская логистика, качество логистического обслуживания, затраты на основе функционально-стоимостного анализа рисков, основных фондов, ресурсной базы и информационной системы управления ресурсами процесса судоремонта (комплекс таких имитационных моделей является базовой частью модуля формирования управленческих решений и представляет собой готовые к применению управленческие решения);

- комплекс прикладных программ: выбор распределений входных величин (например, Input Analyzer), построение «сценариев» экспериментов на имитационной модели (например, Process Analyzer), создание предметных онтологий (например, Ontostudio), создание процессных моделей (например, AllFusion Process Modeler).

5. Подсистема «*Организационный уровень управления*» описывает совокупность лиц, принимающих решения при управлении в ГП. Центральным звеном данной подсистемы является «Руководство ГП», состоящее из лиц, принимающих решения, формирующих экспертную информацию на основе информации, предоставляемой другими звеньями подсистемы, которые и формируют организационную подсистему.

Обсуждение

Исследование деятельности ГП на основе системы поддержки принятия решений позволило проводить эксперименты с комплексом имитационных моделей на примере решения задач анализа основных фондов, качества логистического обслуживания и функционально-стоимостного анализа затрат. Разработанные управленческие решения привели к увеличению показателей фондоотдачи с 1 р. стоимости основных фондов на 35 % и фондоотдачи с 1 руб. стоимости машин и оборудования на 23 %, увеличению интегрального показателя качества логистического обслуживания грузового порта на 36 % и снижению коэффициента текущих затрат на 10 %. Причем 83 % множества сбалансированной системы показателей, составляющих стратегическую карту для определенной стратегии и показателей, полученных в модуле синтеза структуры этой системы, практически полностью совпали с оценками экспертов для соответствующей стратегии. Риск недостижения целей сбалансированной системы показателей уменьшился в среднем на 76 %, составив в среднем 24 % после реализации рекомендованных управленческих решений на имитационной модели грузового порта. Интегральный критерий эффективности после использования системы поддержки принятия управленческих решений увеличился в среднем на 26,3 %, составив в среднем 93,9 %.

Выводы

1. Рассмотрен ГП как система стратегического управления.
2. Проведена формализация задачи повышения эффективности деятельности грузового порта на основе ССП и методологий анализа рисков.
3. Разработана концептуальная структура управления грузовым портом.
4. Разработана структура системы поддержки принятия управленческих решений, имеющая универсальное назначение и позволяющая в зависимости от загружаемого контента и организации взаимодействия модулей решать широкий спектр задач управления сложными логистическими системами. Оригинальность разработанной системы поддержки принятия управленческих решений подтверждена девятью свидетельствами о государственной регистрации программ для ЭВМ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Аракелов Ф. Г. Ключевые проблемы развития морского транспорта / Ф. Г. Аракелов // Морские порты. — 2007. — № 5 (63). — С. 44–46.
2. Кукушкин И. В. Алгоритмическое и программное обеспечение имитационного моделирования процессов переработки каботажных грузов / И. В. Кукушкин, А. П. Нырков, А. А. Нырков // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2016. — № 2 (36). — С. 190–200. DOI: 10.21821/2309-5180-2016-8-2-190-200.
3. Кузнецов А. Л. Методологические принципы управления развитием современного морского порта / А. Л. Кузнецов, А. В. Галин // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2016. — № 4 (38). — С. 43–50. DOI: 10.21821/2309-5180-2016-8-4-43-50.
4. Миротин Л. Б. Методы логистики как фактор эффективности управления / Л. Б. Миротин, В. В. Багинова, Л. С. Федоров, В. Н. Морозов, В. И. Апатцев // Конкурентоспособность в глобальном мире: экономика, наука, технологии. — 2017. — № 2-3 (31). — С. 91–98.
5. Wu P. J. The data-driven analytics for investigating cargo loss in logistics systems / P. J. Wu, M. C. Chen, C. K. Tsau // International Journal of Physical Distribution & Logistics Management. — 2017. — Vol. 47. — Is. 1. — Pp. 68–83. DOI: 10.1108/IJPDLM-02-2016-0061.
6. Zhang C. Research on a Combined Port Cargo-Throughput-Forecast Model / C. Zhang, L. Huang, Z. Zhao // LISS 2012. — Springer, Berlin: Heidelberg, 2013. — Pp. 229–233. DOI: 10.1007/978-3-642-32054-5_34.
7. Бурков В. Н. Теория управления организационными системами и другие науки об управлении организациями / В. Н. Бурков, М. В. Губко, Н. А. Коргин, Д. А. Новиков // Проблемы управления. — 2012. — № 4. — С. 2–10.
8. Лапыгин Ю. Н. Стратегический менеджмент: учеб. пособие / Ю. Н. Лапыгин. — М.: НИЦ ИНФРА-М, 2014. — 208 с.
9. Трахтенгерц Э. А. Компьютерные технологии коррекции целей, стратегических решений и оперативных воздействий в динамике управления / Э. А. Трахтенгерц // Управление большими системами: сб. тр. — 2008. — № 23. — С. 81–109.
10. Protalinskii O. M. Analysis and modelling of complex engineering systems based on the component approach / O. M. Protalinskii, I. A. Shcherbatov, V. N. Esaulenko // World Applied Sciences Journal. — 2013. — Vol. 24. — Pp. 268–275. DOI: 10.5829/idosi.wasj.2013.24.itmies.80033.
11. Макаренко А. Введение в сетевые информационно-управляющие системы [Электронный ресурс] / А. Макаренко. — Режим доступа: <http://www.rdcn.ru/estimation/2010/03042010.shtml> (дата обращения: 14.11.2017).
12. Зацаринный А. А. Системотехнические подходы к созданию системы поддержки принятия решений на основе ситуационного анализа / А. А. Зацаринный, А. П. Сучков // Информатика и ее применения. — 2016. — Т. 10. — № 4. — Pp. 105–113. DOI: 10.14357/19922264160411.
13. Ханова А. А. Оценка качества логистического обслуживания грузового порта с использованием имитационного моделирования / А. А. Ханова, И. О. Григорьева // Датчики и системы. — 2009. — № 5. — С. 11–15.

14. Ханова А. А. Организация принятия решений в виде цикла управления эффективностью организации / А. А. Ханова, А. С. Пономарева // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Управление, вычислительная техника и информатика. — 2011. — № 2. — С. 171–177.
15. Ханова А. А. Управление затратами грузового порта на основе функционально-стоимостного анализа / А. А. Ханова, А. С. Пономарева // Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Серия: Технические науки. — 2011. — № 3. — С. 116–119.
16. Ханова А. А. Совершенствование метода анализа основных фондов предприятия на основе имитационного моделирования / А. А. Ханова, Н. П. Ганюкова // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. — 2011. — Т. 318. — № 6. — С. 5–10.
17. Козлова В. И. Логико-вероятностные модели риска неуспеха социально-экономических систем / В. И. Козлова, Е. А. Крюкова, Е. Д. Соложенцев // Актуальные проблемы экономики и управления. — 2016. — № 1 (9). — С. 103–116.
18. Tubis A. Balanced Scorecard use in Passenger Transport Companies Performing at Polish Market / A. Tubis, S. Werbińska-Wojciechowska // Procedia Engineering. — 2017. — Vol. 187. — Pp. 538–547. DOI: 10.1016/j.proeng.2017.04.412.
19. Недосекин А. О. Информационная модель для описания поля свойств «эффективность – риск – шанс» / А. О. Недосекин, А. Н. Козловский // Информация и космос. — 2016. — № 4. — С. 101–105.
20. Kaplan R. S. Conceptual Foundations of the Balanced Scorecard / R. S. Kaplan // Handbooks of Management Accounting Research. — 2009. — Vol. 3. — Pp. 1253–1269. DOI: 10.1016/S1751-3243(07)03003-9.
21. Пивиков Д. В. Функционально-стоимостной анализа (ФСА) на основе процессного подхода как инструмент управления промышленным предприятием / Д. В. Пивиков, К. И. Колесов // Экономика и предпринимательство. — 2014. — № 4-1 (45-1). — С. 782–787.
22. Батукова Л. Р. Сбалансированная система показателей как система управления бизнесом: проблемы и перспективы развития / Л. Р. Батукова, Г. Я. Белякова // Фундаментальные исследования. — 2015. — № 2-21. — С. 4705–4709.
23. Ханова А. А. Методология стратегического управления грузовым портом на основе имитационного моделирования: дис. ... д-ра техн. наук; специальность: 05.13.10 / А. А. Ханова. — Астрахань: Астраханский государственный технический университет, 2013. — 394 с.

REFERENCES

1. Arakelov, F.G. “Klyuchevye problemy razvitiya morskogo transporta.” *Morskie porty* 5(63) (2007): 44–46.
2. Kukushkin, Ivan Viktorovich, Anatoliy Pavlovich Nyrkov, and Andrey Anatolievich Nyrkov. “Algorithms and software of simulation modeling of the coasting ships processing.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova* 2(36) (2016): 190–200. DOI: 10.21821/2309-5180-2016-8-2-190-200.
3. Kuznetsov, Aleksandr Lvovic, and Aleksandr Valentinovic Galin. “Methodological principles of modern seaport development.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova* 4(38) (2016): 43–50. DOI: 10.21821/2309-5180-2016-8-4-43-50.
4. Mirotn, L.B., V.V. Baginova, L.S. Fedorov, V.N. Morozov, and V.I. Apattsev. “Metody logistiki kak faktor effektivnosti upravleniya.” *Konkurentosposobnost' v global'nom mire: ekonomika, nauka, tekhnologii* 2-3(31) (2017): 91–98.
5. Wu, Pei-Ju, Mu-Chen Chen, and Chih-Kai Tsau. “The data-driven analytics for investigating cargo loss in logistics systems.” *International Journal of Physical Distribution & Logistics Management* 47.1 (2017): 68–83. DOI: 10.1108/IJPDLM-02-2016-0061.
6. Zhang, Chi, Lei Huang, and Zhichao Zhao. “Research on a Combined Port Cargo-Throughput-Forecast Model.” *LISS 2012*. Springer, Berlin: Heidelberg, 2013: 229–233. DOI: 10.1007/978-3-642-32054-5_34.
7. Burkov, V.N., M.V. Gubko, N.A. Korgin, and D.A. Novikov. “Teoriya upravleniya organizatsionnymi sistemami i drugie nauki ob upravlenii organizatsiyami.” *Problemy upravleniya* 4 (2012): 2–10.
8. Lapygin, Yu. N. *Strategicheskii menedzhment: Uchebnoe posobie*. M.: NITs INFRA-M, 2014.

9. Trahtengerts, Eduard A. "Computer technology of purposes, strategic decisions and operative actions correction during dynamic control." *Large-Scale Systems Control* 23 (2008): 81–109.
10. Protalinskii, Oleg Miroslavovich, Ivan Anatolevich Shcherbatov, and Vladimir Nikolaevich Esaulenko. "Analysis and modelling of complex engineering systems based on the component approach." *World Applied Sciences Journal* 24 (2013): 268–275. DOI: 10.5829/idosi.wasj.2013.24.itmies.80033.
11. Makarenko, A. Vvedenie v setetsentricheskie informatsionno-upravlyayushchie sistemy. Web. 14 Nov. 2017 <<http://www.rdcn.ru/estimation/2010/03042010.shtml>>.
12. Zatsarinny, Alexander A., and Alexander P. Suchkov. "Systems engineering approaches to the establishment of a system for decision support based on situational analysis." *Informatics and Applications* 10.4 (2016): 105–113. DOI: 10.14357/19922264160411.
13. Khanova, A.A., and I.O. Grigorieva. "Application of simulation technique for evaluating the logistics quality of a cargo port." *Sensors & Systems* 5 (2009): 11–15.
14. Khanova, Anna Alekseevna, and Anastasiya Sergeevna Ponomaryova. "Organization of decision-making in the form of the management cycle of organization efficiency." *Vestnik of Astrakhan State Technical University. Series: Management, Computer Science and Informatics* 2 (2011): 171–177.
15. Khanova, Anna Alekseevna, and Anastasiya Sergeevna Ponomareva. "Management of expenses of cargo port on the basis of the functional-cost analysis." *University news. North-Caucasian region. Technical sciences series* 3 (2011): 116–119.
16. Khanova, A.A., and N.P. Ganyukova. "Sovershenstvovanie metoda analiza osnovnykh fondov predpriyatiya na osnove imitatsionnogo modelirovaniya." *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta. Inzhiniring georesursov* 318.6 (2011): 5–10.
17. Kozlova, V.I., E.A. Kryukova, and E.D. Solozhentsev. "Logic and probabilistic models of risk of failure of socio-economic systems." *Aktual'nye problemy ekonomiki i upravleniya* 1(9) (2016): 103–116.
18. Tubis, Agnieszka, and Sylwia Werbińska-Wojciechowska. "Balanced Scorecard use in Passenger Transport Companies Performing at Polish Market." *Procedia Engineering* 187 (2017): 538–547. DOI: 10.1016/j.proeng.2017.04.412.
19. Nedosekin, A.O., and A.N. Kozlovskii. "Informatsionnaya model' dlya opisaniya polya svoistv «effektivnost' - risk - shans»." *Informatsiya i kosmos* 4 (2016): 101–105.
20. Kaplan, Robert S. "Conceptual foundations of the balanced scorecard." *Handbooks of management accounting research* 3 (2009): 1253–1269. DOI: 10.1016/S1751-3243(07)03003-9.
21. Pivikov, D.V., and K.I. Kolesov. "Value analysis (VA) based on the process approach as a tool for management of industrial enterprise." *Journal of Economy and entrepreneurship* 4-1(45-1) (2014): 782–787.
22. Batukova, L.R., and G.Y. Belyakova. "Balanced scorecard as control system of business: problems and prospects of development." *Fundamental research* 2-21 (2015): 4705–4709.
23. Khanova, A.A. Metodologiya strategicheskogo upravleniya gruzovym portom na osnove imitatsionnogo modelirovaniya. Dr. diss. Astrakhan': Astrakhanskii gosudarstvennyi tekhnicheskii universitet, 2013.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Ханова Анна Алексеевна —
доктор технических наук, доцент
ФГБОУ ВО «Астраханский государственный
технический университет»
414056, Российская Федерация, г. Астрахань,
ул. Татищева, 16
e-mail: akhanova@mail.ru
Райкова Елена Федоровна —
кандидат технических наук, доцент
ФГБОУ ВО «Астраханский государственный
технический университет»
414056, Российская Федерация, г. Астрахань,
ул. Татищева, 16
e-mail: ref11@mail.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Khanova, Anna A. —
Dr. of Technical Sciences, associate professor
Astrakhan State Technical University
16 Tatishcheva Str., Astrakhan, 414056,
Russian Federation
e-mail: akhanova@mail.ru
Raykova, Elena F. —
PhD, associate professor
Astrakhan State Technical University
16 Tatishcheva Str., Astrakhan, 414056,
Russian Federation
e-mail: ref11@mail.ru

Бондарева, Ирина Олеговна —
кандидат технических наук, доцент
ФГБОУ ВО «Астраханский государственный
технический университет»
414056, Российская Федерация, г. Астрахань,
ул. Татищева, 16
e-mail: orange8@mail.ru

Bondareva, Irina O. —
PhD, associate professor
Astrakhan State Technical University
16 Tatishcheva Str., Astrakhan, 414056, Russian
Federation
e-mail: orange8@mail.ru

*Статья поступила в редакцию 15 ноября 2017 г.
Received: November 15, 2017.*

Научное периодическое издание

**Вестник Государственного университета морского
и речного флота имени адмирала С. О. Макарова**

Том 9. № 6

2017 год

Выпускающий редактор

Н. А. Карамзина

Дизайн и верстка *М. Н. Евсюткина*

Технический редактор *Е. И. Тюленева*

Подписано в печать с оригинал-макета 22.12.17. Формат 60×90/8
Гарнитура Times New Roman. Усл. печ. л. 26,5. Тираж 500 экз. Заказ № 703/2017

Государственный университет морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова
198035, Санкт-Петербург, ул. Двинская, 5/7