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. № 4

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

САНКТ-ПЕТЕРБУРГ
2017

ББК 95

Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — СПб.: ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова, 2017. — Т. 9. — № 4. — 228 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

Том 9. № 4
2017

ЭКСПЛУАТАЦИЯ ВОДНОГО ТРАНСПОРТА, СУДОВОЖДЕНИЕ 681

Гриняк В. М., Девятисильный А. С., Люлько В. И. Оценка опасности трафика морской акватории по данным автоматической идентификационной системы 681

Ермаков С. В. Некоторые особенности прохождения проливов с сильными приливо-отливными течениями (на примере пролива Пентленд-Ферт).....691

Янченко А. А., Маликова Т. Е., Вольнов И. Н. Разработка модели исследования влияния зонирования контейнерного терминала на эффективность его работы 704

Федоренко К. В., Оловянников А. Л. Исследование основных параметров генетического алгоритма применительно к задаче поиска оптимального маршрута.....714

Кузнецов А. Л., Щербакова-Слюсаренко В. Н., Эглит Я. Я. Разработка методики расчета потребности в ресурсах, необходимых для выполнения складских операций 724

ВОДНЫЕ ПУТИ СООБЩЕНИЯ И ГИДРОГРАФИЯ 735

Афонин А. Б., Королёв И. Ю., Тезиков А. Л. Исследование факторов, влияющих на навигационную аварийность в условиях мелководья 735

Каретников В. В., Зайцев А. И., Ратнер Е. А. Внедрение автоматизированных тральных комплексов для обеспечения безопасности навигации на внутренних водных путях Российской Федерации.....744

СУДОСТРОЕНИЕ И СУДОРЕМОНТ 752

Гафаров А. М., Алиев Ч. М., Кулиев А. М. Исследование пооперационного изменения качества поверхностного слоя высокоточных деталей судовых машин и механизмов, обработанных различными методами.....752

Петров В. М., Безпальчук С. Н., Яковлев С. П. О влиянии структуры на прочность изделий из пластиков, получаемых методом 3D-печати 765

Куликов В. А. Погрешности измерений в судоремонте и оценка моментов выборочных распределений 777

СУДОВЫЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ УСТАНОВКИ, СИСТЕМЫ И УСТРОЙСТВА.....786

Кузнецов С. Е., Кудрявцев Ю. В. Судовые электрические источники света: состояние и перспективы развития 786

Кошелев С. В., Ейдеюс А. И. Учет ограничений при оптимизации параметров внутритрубного кипения хладагентов в судовых испарителях 795

РЕДАКЦИОННЫЙ СОВЕТ

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Члены редколлегии:

О. К. Безюков, д.т.н.
А. Т. Беккер, д.т.н.
Н. И. Ватин, д.т.н.
В. В. Веселков, д.т.н.
П. А. Гарибин, д.т.н.
Д. П. Голоскоков, д.т.н.
В. А. Жуков, д.т.н.
Ю. М. Искандеров, д.т.н.
О. Г. Каратаев, д.т.н.
В. В. Каретников, д.т.н.
А. В. Кириченко, д.т.н.
М. Н. Кирсанов, д.ф.-м.н.
Т. А. Клепикова, д.ф.н.
М. А. Колосов, д.т.н.
Е. А. Королева, д.э.н.
И. И. Костылев, д.т.н.
А. Л. Кузнецов, д.т.н.
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.
А. Л. Тезиков, д.т.н.
В. И. Черненко, д.т.н.
В. Б. Чистов, д.т.н.

Вынгра А. В., Авдеев Б. А. Использование программно-аппаратного моделирования при проектировании системы управления судовой холодильной установкой 806

Кулешов И. И., Ходаковский В. М. Повышение эффективности лазерного упрочнения чугунных деталей судовых энергетических установок....814

ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ КОМПЛЕКСЫ И СИСТЕМЫ....829

Сугаков В. Г., Варламов Н. С., Малышев Ю. С. Обоснование реализации фазосмещающего устройства с коррекцией кода в зависимости от частоты напряжения 829

Приходько В. М., Приходько И. В. Оценка интегральных характеристик электропотребления в судовых электроэнергетических системах с полупроводниковыми преобразователями....838

ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И АВТОМАТИЗАЦИЯ НА ТРАНСПОРТЕ 849

Чертовской В. Д. Методы изучения процессов планирования в интеллектуальных автоматизированных системах управления производством 849

Рудницкая Ю. Ю. Методы определения шумов и выбросов в структуре используемых данных на примере длительности обработки судозахода на нефтяном терминале....866

Тындыкарь Л. Н., Васильченко Д. С. Оптимизация информационного обеспечения образовательного процесса....874

Черняков А. В. Проектирование системы резервного копирования данных....884

Кузнецов В. А. Распределённые вычисления для оптимизации оперативного управления транспортным конвейером шлюзованной системы 892

CONTENST

OPERATION OF WATER TRANSPORT, NAVIGATION 681

Grinyak V. M., Devyatisilnyi A. S., Lulko V. I. Use of automatic identification system data for estimation of marine traffic safety 681

Ermakov S. V. Some features of passage strait with fast tidal stream (strait for example – Pentland Firth) 691

Yanchenko A. A., Malikova T. E., Volnov I. N. Developing the model for study of terminal zoning impact on its operating efficiency 704

Fedorenko K. F., Olovyannikov A. L. Research of the main parameters of the genetic algorithm for the problem of searching the optimal route 714

Kuznetsov A. L., Shcherbakova-Slyusarenko V. N., Eglit Ya. Ya. The assessment of the operational resources needed for warehouse operations 724

WATERWAYS AND HYDROGRAPHY 735

Afonin A. B., Korolev I. Ju., Tezikov A. L. A study of the factors influencing navigational accidents in shallow water 735

Karetnikov V. V., Zaitsev A. I., Ratner E. A. Introduction of automated hydrographic sweeping systems for navigation safety on inland waterways Russian Federation 744

SHIPBUILDING AND SHIP REPAIR 752

Gafarov A. M., Aliyev Ch. M., Guliyev A. M. Popperational change of surface layer quality of steel parts after different mechanical processing methods 752

Petrov V. M., Bezpal'chuk S. N., Yakovlev S. P. 3D-printing from plastics: inner structure influence on the strength 765

Kulikov V. A. Measurement errors in ship repair and estimation of moments of selective distribution 777

SHIP POWER PLANTS, SYSTEMS AND DEVICES 786

Kuznetsov S. Ye., Kudryavtsev Yu. V. Ship electric light sources: state and prospects of development 786

Koshelev S. V., Eideyus A. I. Account of limits during optimization of refrigerants in-tube boiling parameters in shipboard evaporators 795

Vyngra A. V., Avdeyev B. A. Use of software and hardware modeling for designing the ship's refrigeration control system 806

Kuleshov I. I., Khodakovskiy V. M. Improvement efficiency of laser strengthening of iron details ship's power plants 814

ELECTRICAL EQUIPMENT AND SYSTEMS 829

Sugakov V. G., Varlamov N. S., Malyshev Yu. S. Rationale for realization of phase-shifting device with code adjustment depending on frequency of voltage 829

Prikhodko V. M., Prikhodko I. V. Estimation of integral characteristics of energy consumption in marine power systems with semiconductor converters 838

Volume 9. № 4

2017

EDITOR-IN-CHIEF

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Editorial Collegium:

O. K. Bezyukov,
doctor of technical Sciences
A. T. Bekker,
doctor of technical Sciences
N. I. Vatin,
doctor of technical Sciences
V. V. Veselkov,
doctor of technical Sciences
P. A. Garibin,
doctor of technical Sciences
D. P. Goloskokov,
doctor of technical Sciences
V. A. Zhukov,
doctor of technical Sciences
Y. M. Iskanderov,
doctor of technical Sciences
O. G. Karatayev,
doctor of technical Sciences
V. V. Karetnikov,
doctor of technical Sciences
A. V. Kirichenko,
doctor of technical Sciences
M. N. Kirsanov,
doctor of phys.-math. Sciences
T. A. Klepikova,
doctor of philosophical Sciences
M. A. Kolosov,
doctor of technical Sciences
Ye. A. Koroleva,
doctor of economic Sciences
I. I. Kostylev,
doctor of technical Sciences
A. L. Kuznetsov,
doctor of technical Sciences
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
A. L. Tezikov,
doctor of technical Sciences
V. I. Chernenko,
doctor of technical Sciences
V. B. Chistov,
doctor of technical Sciences

INFORMATION TECHNOLOGY AND AUTOMATION IN TRANSPORT 849

Chertovskoy V. D. Research methods of planning processes in adaptive automatized manufacturing control systems 849

Rudnitckaia Yu. Yu. Methods of detection of noises and outliers in the data structure on the example of ship handling duration at an oil terminal 866

Tyndykar L. N., Vasilchenko D. S. Optimization of information support of educational process 874

Chernyakov A. V. Data backup system planning 884

Kuznetsov V. A. Distributed computing for optimization of operational management of the transport conveyor of lock system 892

ЭКСПЛУАТАЦИЯ ВОДНОГО ТРАНСПОРТА, СУДОВОЖДЕНИЕ

DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-4-681-690

USE OF AUTOMATIC IDENTIFICATION SYSTEM DATA FOR ESTIMATION OF MARINE TRAFFIC SAFETY

V. M. Grinyak[1], A. S. Devyatisilnyi[2], V. I. Lulko[3]

[1] — Far Eastern Federal University, Vladivostok, Russian Federation
[2] — Institute of Automation and Control Processes, Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences, Vladivostok, Russian Federation
[3] — Vladivostok State University of Economics and Service, Vladivostok, Russian Federation

This paper is about the problem of marine traffic safety. It is the key problem of vessels. In the areas with high intensity traffic marine safety is achieved with set of regulations, coastal and ship navigation systems, control services and COLREGS. Navigation rules for each water area usually has traffic movement instructions based on geographical features. There are wide variety of math methods available these days to solve navigation problems such as game theory methods, genetic algorithms, optimization methods. However, creating traffic patterns only based on math methods almost never possible due to wide variety of informal rules based on common and personal experience with consideration of natural condition such as season and weather. Often traffic pattern applied for given sea area based on expert analysis. One of the most important parameter of marine traffic safety is a frequency of collision. High values of collision frequency usually trigger deep analyses of traffic pattern with following its optimization. The prospective way to estimate this parameter is using data available from Automatic Identification System (AIS). The paper is focused on the problem of "ship-ship" collision occurrences estimation based on analyses of historical AIS data of ship traffic available at public internet resources. Even though publicly available data are limited to solve overall navigation problems there are still sufficient amount of information to solve navigation problems at certain sea areas.

The model is built around available AIS parameters like latitude, longitude, velocity, course, time of data arrival and age of the data. The "ship-ship" collision detection is solved for each ship pairs at the given area based on common navigation theory. Level of collision defined based on the closest point of approach (CPA) and ship physical sizes. By data accumulation for long period of time (day, week, month) and displaying them on the map it is possible to define location and frequency of danger CPA. Given model also taking in account the fact of the data discreteness. This work presents the results of real experiments at the areas of Tsugaru strait and Tokyo bay. The experiment results align with assumption that most frequent occurrence of danger situation are the port areas. However, with great total number of ships at the area the frequency of danger situations dramatically increasing.

The paper gives a conclusion that even though public available AIS data has limited update frequency they still can be used for solving navigation problems. Safety of traffic pattern estimation is possible based on analyses of numbers and localizations of danger CPA. Experiments using real data of ship traffic at sea areas show that the approach maybe prospective to analyses ship traffic pattern safety.

Keywords: vessel traffic control, collision avoidance, trace, closest point of approach, AIS.

For citation:
Grinyak, Victor M., Alexander S. Devyatisilnyi, and Victor I. Lulko. "Use of automatic identification system data for estimation of marine traffic safety." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova* 9.4 (2017): 681–690. DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-4-681-690.

УДК 519.68:15:681.5

ОЦЕНКА ОПАСНОСТИ ТРАФИКА МОРСКОЙ АКВАТОРИИ ПО ДАННЫМ АВТОМАТИЧЕСКОЙ ИДЕНТИФИКАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ

В. М. Гриняк[1] А. С. Девятисильный[2], В. И. Люлько[3]

[1] — Дальневосточный федеральный университет, Владивосток, Российская Федерация
[2] — Институт автоматики и процессов управления ДВО РАН, Владивосток, Российская Федерация

[3] — Владивостокский государственный университет экономики и сервиса, Владивосток, Российская Федерация

Статья посвящена проблеме обеспечения навигационной безопасности движения на морских акваториях. Рассматривается задача оценки частоты наступления опасных ситуаций «судно – судно» на выбранном участке акватории на основе ретроспективного анализа движения судов. При этом предлагается обратиться к навигационным данным судов, предоставляемых Автоматической идентификационной системой (АИС) и доступных на открытых интернет-ресурсах. Частота наступления опасных ситуаций является важнейшим показателем, определяющим безопасность движения на акватории. Метрику опасности того или иного участка акватории предлагается ввести (как один из возможных вариантов) на основе числа и локализации точек кратчайшего сближения судов.

Проблемой при использовании данных АИС, предоставляемых открытыми интернет-ресурсами, является ограниченность точности определения навигационных параметров судов и частоты поступления информации. В работе рассмотрен формат представления исходных данных о движении и имеющиеся ограничения. Предлагается метод моделирования движения судов, основанный на приведении глобальных географических координат к местным прямоугольным и кусочно-линейной интерполяции. Это позволяет определить координаты каждой пары судов в момент кратчайшего сближения, что, в свою очередь, даёт возможность оценить степень опасности реализуемой схемы движения судов и необходимость экспертного анализа для выработки её менее опасных конфигураций.

Работа сопровождается результатами натурных исследований движения судов в Сангарском проливе и Токийском заливе, которые подтверждают перспективность предложенного подхода. Несмотря на «грубость» исходных данных, они несут достаточное количество информации для построения устойчивой картины опасных участков морских акваторий.

Ключевые слова: управление движением судов, опасное сближение, траектория движения, точка кратчайшего сближения, АИС.

Для цитирования:
Гриняк В. М. Оценка опасности трафика морской акватории по данным автоматической идентификационной системы / В. М. Гриняк, А. С. Девятисильный, В. И. Люлько // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2017. — Т. 9. — № 4. — С. 681–690. DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-4-681-690.

Введение

Навигационная безопасность движения является центральной проблемой эксплуатации водных транспортных путей. В зонах интенсивного судоходства она обеспечивается целым комплексом специальных мер и инструментов: береговыми и бортовыми навигационными системами, диспетчеризацией коллективного движения, правилами судоходства и т. д. Последние, в свою очередь, состоят из норм, определяемых Международными правилами предупреждения столкновений судов в море (МППСС-72) [1], и локальных положений, отражающих специфику движения на конкретной акватории.

Правила судоходства на конкретной акватории, как правило, предписывают соблюдение определённой схемы движения, зависящей от географии акватории и особенностей её трафика [2] – [4]. Нередко возможны различные варианты такой схемы; выбор в пользу того или иного из них обусловлен необходимостью обеспечения максимальной безопасности движения и практическими соображениями [5]. К настоящему времени выработан солидный арсенал математических методов для решения задач организации движения различного транспорта: например, методы теории игр [6], генетические алгоритмы [7], методы оптимизации [8] – [10] и др. Несмотря на это генерация актуальной схемы движения судов на конкретной акватории на основе сугубо математического формального представления задачи вряд ли возможна. Причина этого состоит в значительной доле неформальных положений, используемых в судоводительской практике [11] – [13], обусловленных личным и коллективным профессиональным опытом разрешения опасных навигационных ситуаций в различных внешних условиях (погода, время суток, менталитет и т. д.). В связи с этим схема движения судов определяется, как правило, на основе экспертного анализа различной информации об акватории [14] – [19].

Одним из важнейших показателей, определяющих навигационную безопасность движения на акватории, является частота наступления опасных ситуаций [20]. Её высокое значение служит побудительным мотивом тщательного изучения существующей схемы движения с целью последующего синтеза новой схемы, обеспечивающей лучшие показатели безопасности. Перспективным путём к оценке этого показателя или других свойств трафика акватории [21], [22] является использование данных АИС.

В настоящей работе рассматривается задача оценки частоты наступления опасных ситуаций «*судно – судно*» на основе анализа ретроспективных данных о движении судов, предоставляемых открытыми интернет-ресурсами — дополнительными сервисами АИС. Эти исходные данные имеют свои особенности, определяющие возможности и ограничения их использования при решении практических и исследовательских задач [23]. В частности, в них ограничена точность определения навигационных параметров судов и частота поступления информации. Тем не менее имеющиеся данные вполне позволяют оценить некоторые особенности трафика наблюдаемых акваторий и в частности получить представление о тех их участках, где требуется усиление контроля со стороны береговых систем управления движением судов и / или модернизация существующей схемы движения.

Методы и материалы

Рассмотрим основные модельные представления задачи. Данные о движении судов, доступные на открытых интернет-ресурсах типа [24], представляют собой множество кортежей вида

$$\{SID,\ LAT,\ LON,\ V,\ K,\ TIME,\ AGE\}, \tag{1}$$

где *SID* — идентификатор судна; *LAT* — географическая широта; *LON* — географическая долгота; *V* — скорость движения; *K* — курс; *TIME* — время поступления данных; *AGE* — возраст данных, определяющий фактический момент времени, которому они соответствуют. Кроме того, доступна дополнительная информация о каждом судне: тип, флаг, порт назначения и др.

Характерная точность представления географических координат судна — три-четыре знака после запятой, что соответствует погрешности 10 – 100 м на местности. Точность представления скорости — 0,1 уз, точность представления курса — 1 град. Данные обновляются один раз в 60 с (дискретность параметра — *TIME*), при этом фактическое обновление данных (задаётся параметром *AGE*) происходит, как правило, ещё реже: для интенсивно маневрирующих судов в акватории морских портов данные обновляются раз в 1 – 3 мин, для судов, движущихся прямолинейно и равномерно по морским трассам, возраст данных может достигать нескольких часов.

В том случае, если требуется осуществлять моделирование движения судна по конкретной локальной акватории, характерные размеры которых обычно не превышают сотни километров, целесообразно перейти от географических координат судна к местным прямоугольным, преобразовав их по правилу:

$$x = R\cos(LAT)\sin(LON - LON^*);$$
$$y = R\sin(LAT - LAT^*),$$

где R — средний радиус Земли при представлении её сферой; LAT^* и LON^* — соответственно широта и долгота точки, принимаемой за начало местной прямоугольной системы координат.

В силу локальности задачи погрешности, обусловленные представлением Земли сферой, а не эллипсоидом или геоидом, будут несущественными. Рассмотрим задачу «*судно – судно*» для каждой пары судов, находящихся на акватории. Будем иметь следующие уравнения движения судов:

$$x_1(t) = x_1\left(t_1^0\right) + V_1\sin\left(K_1\right)\left(t - t_1^0\right);$$
$$y_1(t) = y_1\left(t_1^0\right) + V_1\cos\left(K_1\right)\left(t - t_1^0\right);$$
$$x_2(t) = x_2\left(t_2^0\right) + V_2\sin\left(K_2\right)\left(t - t_2^0\right);$$

$$y_2(t) = y_2\left(t_2^0\right) + V_2 \cos\left(K_2\right)\left(t - t_2^0\right),$$

где $x_1(t)$, $y_1(t)$, $x_2(t)$, $y_2(t)$ — координаты первого и второго судна в момент времени t; V_1, K_1, V_2, K_2 — соответственно скорости и курсы первого и второго судна; t_1^0, t_2^0 — моменты времени, соответствующие возрасту данных каждого судна, так что $t_i^0 = TIME_i - AGE_i$.

При таких представлениях расстояние между судами в момент времени t составляет

$$r(t) = \sqrt{\left(x_1(t) - x_2(t)\right)^2 + \left(y_1(t) - y_2(t)\right)^2}\ .$$

Решая уравнение $dr(t)/dt = 0$ относительно t, будем иметь момент времени кратчайшего сближения судов t_{CPA}, соответствующую ему величину $r_{CPA} = r(t_{CPA})$ и координаты судов $x_1\left(t_{CPA}\right)$, $y_1\left(t_{CPA}\right)$ $x_2\left(t_{CPA}\right)$, $y_2\left(t_{CPA}\right)$.

Величина r_{CPA}, соотнесённая с геометрическими размерами судов, характеризует степень опасности ситуации в момент кратчайшего сближения, величина t_{CPA} и координаты судов — время и место её предполагаемого возникновения. Обрабатывая наборы данных о движении судов за большой период времени (сутки, неделя, месяц) и отображая их на карте, можно получить представление о частоте опасных сближений и локализации точек кратчайшего сближения, соответствующих «опасным» значениям — r_{CPA}. Полученная таким образом информация может быть использована при экспертном анализе трафика конкретной морской акватории.

Данные о состоянии судов в момент кратчайшего сближения, получаемые описанным способом, характеризуются множественностью, т. е. для каждой пары судов будем иметь различные наборы данных:

$$\left\{r_{CPA},\ t_{CPA},\ x_1(t_{CPA}),\ y_1(t_{CPA}),\ x_2(t_{CPA}),\ y_2(t_{CPA})\right\}, \qquad (2)$$

получаемые на основе множества (1) при различных значениях *TIME*. Оцененное время до момента кратчайшего сближения, равное t_{CPA} — *TIME* (интерес представляют только положительные его значения, т. е. «будущее»), может быть существенно больше периода обновления данных (дискретность параметра *TIME*). В этом случае из множества наборов данных (2), соответствующих нескольким «предполагаемым» точкам кратчайшего сближения, выбирается тот, которому соответствует минимальное положительное время до наступления события t_{CPA} — *TIME* как наиболее достоверный.

Указанная разреженность исходных навигационных данных, предоставляемых ресурсами типа [24], и их относительная «грубость» могут быть серьёзным барьером для их практического использования. Вместе с тем при решении рассматриваемой задачи оценки частоты наступления опасных ситуаций на том или ином участке акватории они вполне способны дать устойчивую картину явления, что подтверждается проведёнными экспериментами.

Результаты

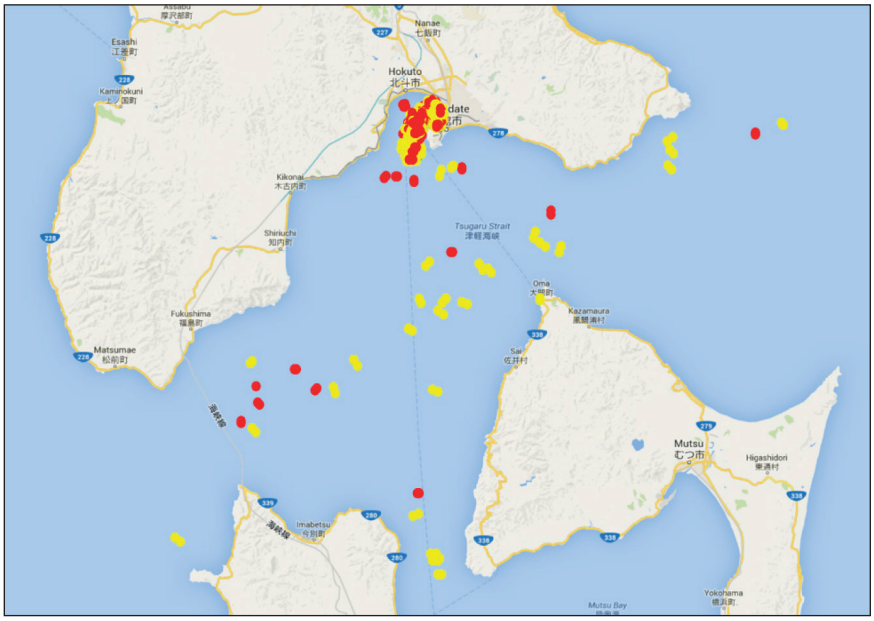
Исследования проводились на основе данных о движении судов, полученных с ресурса [24] с помощью специально созданной программной системы [25]. Было принято, что достоверными являются лишь те точки кратчайшего сближения, оценённое время движения до которых t_{CPA} — *TIME*, положительно (т. е. «будущее») и не превышает 5 мин.

На рис. 1, *а* показаны точки кратчайшего сближения судов, движущихся в Сангарском проливе. Красными кружками обозначены координаты судов, сблизившихся на расстояние меньше двух длин корпуса судна, жёлтыми — меньше пяти длин корпуса. Рисунок построен по данным, собранным в течение одной недели летом 2016 г. Как и ожидалось, наибольшее количество опасных сближений наблюдается непосредственно в портовых водах (порт Хакодате), в контексте обсуждаемой задачи они не представляют интереса.

Сангарский пролив интересен особенностями трафика, в нем ярко выражены пересекающиеся судопотоки в направлениях «север – юг» и «запад – восток» [26]. Несмотря на довольно высокую интенсивность движения (в проливе находится одновременно около 100 судов), частота

их опасных сближений низкая (около двух «красных» ситуаций в сутки), при этом соответствующие точки не образуют устойчивых зон. Такое движение вполне поддаётся регулированию существующими средствами. На рис. 1, *б* показаны точки кратчайшего сближения судов, движущихся в Токийском заливе. Рис. 1 построен по данным, собранным в течение одних суток летом 2016 г., в заливе при этом одновременно находилось около 700 судов. Такая плотность движения обуславливает высокое количество опасных сближений, соответствующие точки густо разбросаны по всему заливу (не только в портовых водах).

а)



б)

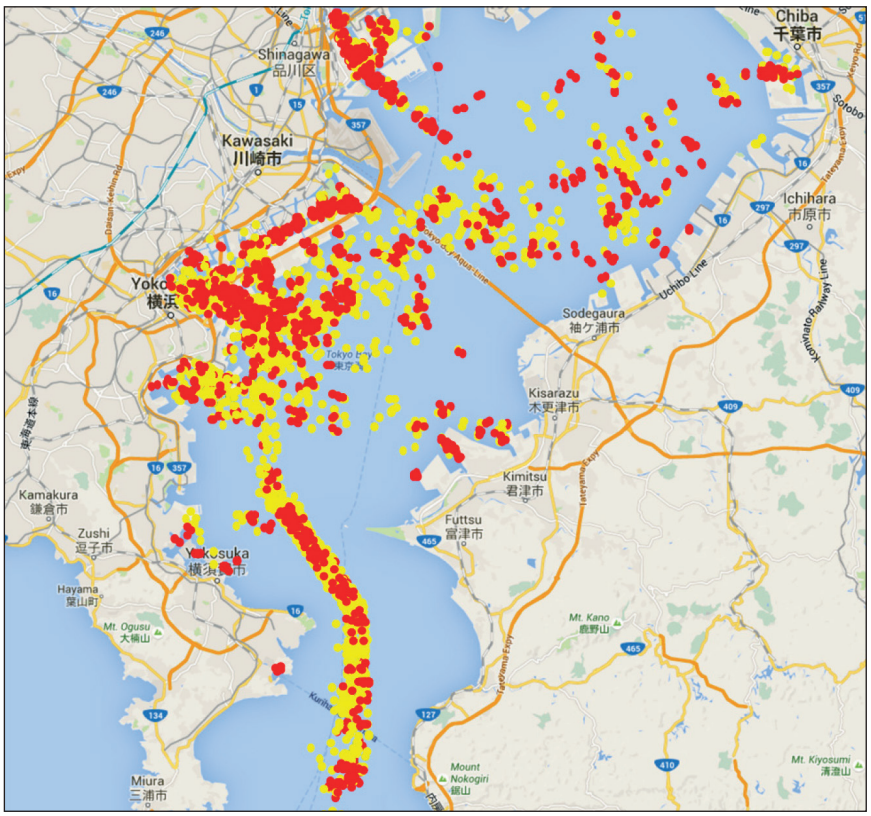


Рис. 1. Точки кратчайшего сближения судов в Сангарском проливе (*а*) и Токийском заливе (*б*)

На рис. 2 показаны соответствующие данным рис. 1, *б* средние частоты наступления «красных» опасных ситуаций на том или ином участке акватории Токийского залива. Чаще всего опасные ситуации наблюдаются у западного берега залива, самая высокая частота наблюдается в портовых водах Иокогамы. Для обсуждаемой задачи представляют интерес подходы к порту Иокогама (синяя область и голубые пятна восточнее порта), где средние частоты опасных сближений достигают четырех – шести случаев в час и зона фарватера находится у устья залива близ Йокосуки (три синих овала), где средние частоты опасных сближений составляют два – четыре случая в час, а в отдельные промежутки времени их количество может быть и больше. Это свидетельствует о высокой нагрузке операторов береговой системы управления движением судов, отвечающих за этот участок акватории, вынужденных «отрабатывать» несколько опасных ситуаций одновременно. Судоводители, чьи суда находятся здесь, *должны уделять повышенное внимание окружающей обстановке и быть предельно осторожными*. Для регулирующих служб это может служить сигналом о необходимости изменения правил движения на указанных участках акватории.

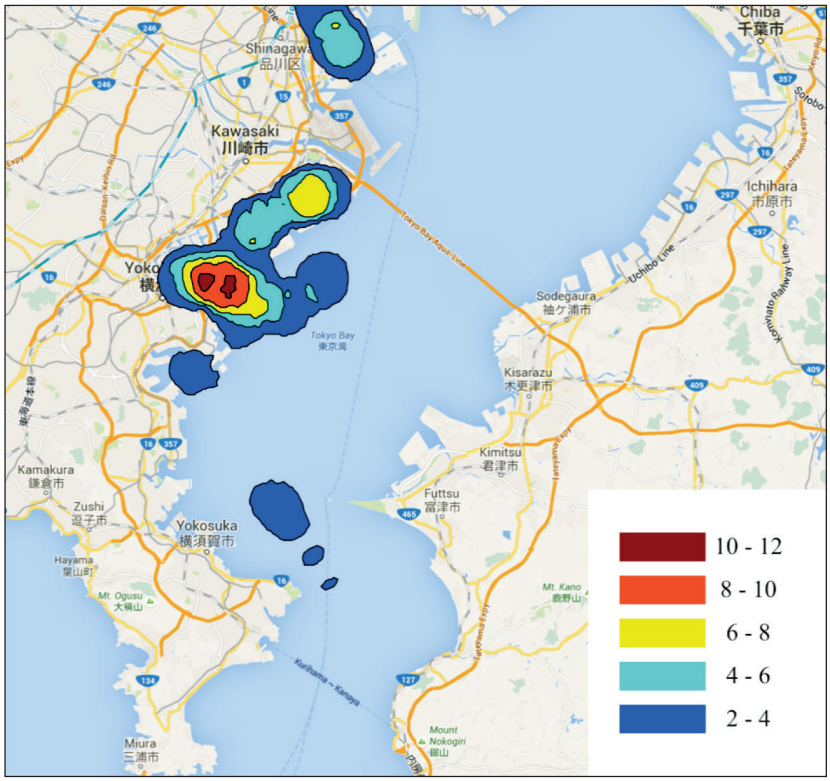


Рис. 2. Средняя частота опасных сближений судов в Токийском заливе (ситуаций в час)

Обсуждение

Полученные результаты позволяют сформировать систематизированное представление о степени опасности движения на различных участках морских акваторий. Вообще, такая оценка возможна на основе различных метрик. Так, в работе [21] авторы используют модель относительного движения двух судов и выделяют точки акватории, в которых движение распознано как потенциально опасное, т. е. ведущее к чрезмерному сближению. Это соответствует тем положениям судов, где бортовые (или береговые) системы предупреждения столкновений подают тревожный сигнал. Таким образом, оценивается опасность движения с точки зрения эмоциональной нагрузки на судоводителей. При этом используются «первичные» данные АИС, имеющие высокую точность навигационных параметров и частоту обновления. В настоящей работе показана возможность использования для решения рассматриваемой задачи и «разреженных» ретроспективных данных, доступных широкому кругу специалистов.

В работе [22] в качестве показателя степени загруженности акватории предлагается использовать плотность движения судов. Вместе с тем такой подход даёт лишь очень приблизительное представление о степени опасности. Например, в условиях высокой плотности движения по выделенным регулируемым фарватерам трафик может быть сравнительно безопасным, в то же время даже низкая плотность движения в условиях нерегулируемых хаотично пересекающихся судопотоков может провоцировать большое число опасных ситуаций. С этой точки зрения метрика, основанная на оценке частоты опасных сближений, гораздо более информативна.

Выводы

1. Данные о движении судов на морских акваториях, предоставляемые АИС, характеризуются высокой точностью и информативностью, что обусловливает их массовое использование при решении различных прикладных задач. Однако такие первичные данные, как правило, недоступны для исследовательских коллективов, не связанных с производственной отраслевой средой. При проведении научных исследований альтернативой может выступать использование данных, предоставляемых специализированными открытыми интернет-ресурсами. Несмотря на невысокую частоту обновления и низкую точность предоставления информации о движении судов такими источниками, они могут быть использованы для изучения особенностей трафика морских акваторий. При этом актуальными являются различные варианты интерполяции данных о движении (например, кусочно-линейная интерполяция).

2. Оценка степени опасности трафика возможна на основе анализа числа и локализации точек кратчайшего сближения судов. По сути, таким образом неявно вводится метрика, определяющая опасность того или иного участка акватории. Разумеется, возможны и другие метрики, характеризующие те или иные стороны (интерпретации) понятия «опасная ситуация» [27].

3. Проведённые исследования на основе реальных данных о движении судов подтвердили перспективность применения предложенного подхода. Несмотря на грубость исходных данных, они несут достаточно информации для сводного представления характера движения на акватории. Например, на основе предложенного способа можно выстроить устойчивую картину опасных участков акваторий и определить эмоциональную нагрузку на операторов береговых систем управления движением и судоводителей. Это представляет большую ценность для служб, реализующих мероприятия по обеспечению безопасности движения, открывая перспективную возможность оценки степени опасности схемы движения, реализуемой на акватории, и выработки рекомендаций по её изменению в сторону менее опасных конфигураций.

Работа поддержана грантом Российского фонда фундаментальных исследований (РФФИ), проект 15-08-00234 «Моделирование интеллектуальной системы поддержки принятия решений при обеспечении навигационной безопасности коллективного движения судов на морских акваториях».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Международные правила предупреждения столкновений судов в море 1972 (МППСС- 72). — М.: РКонсульт, 2004. — 80 с.

2. *Погосов С. Г.* Безопасность плавания в портовых водах / С. Г. Погосов. — М.: Транспорт, 1977. — 136 с.

3. *Лентарёв А. А.* Морские районы систем обеспечения безопасности мореплавания / А. А. Лентарев. — Владивосток: Изд-во ГМУ им. адм. Г. И. Невельского, 2004. — 120 с.

4. *Лентарёв А. А.* Применение судовой навигационной аппаратуры для определения статистических характеристик судопотоков / А. А. Лентарёв, М. О. Максимов // Транспортное дело России. — 2015. — № 6. — С. 156–158.

5. *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.

6. *Александров В. А.* Аппаратно-программный комплекс для моделирования задач группового управления мобильными роботами / В. А. Александров, А. И. Кобрин // Вестник МЭИ. — 2011. — № 3. — С. 88–95.

7. *Каляев И. А.* Методы и модели коллективного управления в группах роботов. / И. А. Каляев, А. Р. Гайдук, С. Г. Капустян. — М.: Физматлит, 2009. — 280 с.

8. *Zeng Z.* A survey on path planning for persistent autonomy of autonomous underwater vehicles / Z. Zeng, L. Lian, K. Sammut, F. He, Y. Tang, A. Lammas // Ocean Engineering. — 2015. — Vol. 110. — Part A. — Pp. 303–313. DOI: 10.1016/j.oceaneng.2015.10.007.

9. *Кирсанов М. Н.* Анализ алгоритмов выбора оптимальных маршрутов группы судов / М. Н. Кирсанов // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2016. — № 2 (36). — С. 183–190. DOI: 10.21821/2309-5180-2016-8-2-183-190.

10. *Lazarowska A.* Ship's trajectory planning for collision avoidance at sea based on ant colony otimisation / A. Lazarowska // Journal of Navigation. — 2015. — Vol. 68. — Is. 2. — Pp. 291–307. DOI: 10.1017/S0373463314000708.

11. *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.

12. *Мироненко А. А.* Модель программного движения судна в стесненных водах / А. А. Мироненко // Мехатроника, автоматизация, управление. — 2013. — № 2. — С. 65–70.

13. *Tam Ch. K.* Review of collision avoidance and path planning methods for ships in close range encounters / Ch. K. Tam, R. Bucknall, A. Greig // Journal of Navigation. — 2009. — Vol. 62. — Is. 3. — Pp. 455–476. DOI: 10.1017/S0373463308005134.

14. *Клюев В. В.* Использование теории геометрических вероятностей для оценки показателя стеснённости акватории северного морского пути / В. В. Клюев // Навигация и гидрография. — 2016. — № 46. — С. 20–28.

15. *Пламмер К. Дж.* Маневрирование судов в узкостях / К. Дж. Пламмер. — Л.: Судостроение, 1986. — 80 с.

16. *Лобанов А. А.* Методические аспекты проектных работ по обеспечению навигационной безопасности плавании в современных условиях / А. А. Лобанов, Ю. В. Румянцев, Д. М. Бухов // Навигация и гидрография. — 2013. — № 35. — С. 29–38.

17. Общие положения об установлении путей движения судов, № 9036. — ГУНиО МО СССР, 1987. — 32 с.

18. *Таратынов В. В.* Целесообразность разделения морских путей / В. В. Таратынов // Морской флот. — 1969. — № 9. — С. 19–20.

19. *Таратынов В. П.* Судовождение в стесненных районах / В. П. Таратынов. — М.: Транспорт, 1980. — 128 с.

20. *Бродский П. Г.* К вопросу оценки влияния интенсивности судоходства на аварийность / П. Г. Бродский, Ю. В. Румянцев, С. Н. Некрасов // Навигация и гидрография. — 2010. — № 30. — С. 36–42.

21. *Weng J.* Ship collision frequency estimation in port fairways: a case study / J. Weng, S. Xue // Journal of Navigation. — 2015. — Vol. 68. — Is. 3. — Pp. 602–618. DOI: 10.1017/S0373463314000885.

22. *Wu L.* Mapping global shipping density from AIS data / L. Wu, Y. Xu, Q. Wang, F. Wang, Zh. Xu // Journal of Navigation. — 2016. — Vol. 70. — Is. 1. — Pp. 67–81. DOI: 10.1017/S0373463316000345.

23. Сметанин С. И. Способ реализации программной веб-части системы спутникового мониторинга / С. И. Сметанин, В. А. Игнатюк, А. А. Евстифеев // Информационные технологии. — 2015. — Т. 21. — № 6. — С. 448–455.

24. MarineTraffic [Электронный ресурс]. — Режим доступа: http://www.marinetraffic.com (дата обращения: 01.06.17).

25. *Головченко Б. С.* Информационная система сбора данных о движении судов на морской акватории / Б. С. Головченко, В. М. Гриняк // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2014. — № 2 (24). — С. 156–162.

26. *Гриняк В. М.* О планировании вычислительных экспериментов при исследовании методов обеспечения безопасности коллективного движения судов / В. М. Гриняк, А. С. Аникеева, Н. Ю. Васильченко, Е. Г. Гусев // Современные наукоемкие технологии. — 2016. — № 4-2. — С. 230–234.

27. *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.

REFERENCES

1. International Regulations for Preventing Collisions at Sea 1972 (COLREGs-72). M: RKonsul't, 2004.

2. Pogosov, S.G. *Bezopasnost plavaniya v portovyh vodah*. M: Transport, 1977.

3. Lentarev, A.A. *Morskie raiony system obespecheniya bezopasnosti moreplavaniya*. Vladivostok: GMU im. Nevelskogo, 2004.

4. Lentarev, A., and M. Maksimov. "Using navigation equipment to determine the vessel traffic statistics." *Transportnoye delo Rossii* 6 (2015): 156–158.

5. 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.

6. Alexandrov, V. A., and A. I. Kobrin. "The hardware-software complex for modeling of grouped control problems for mobile robots." *MPEI Vestnik* 3 (2011): 88–95.

7. Kaljaev, I. A., A. R. Gajduk, and S. G. Kapustjan. *Modeli i algoritmy kollektivnogo upravlenija v gruppah robotov*. M: Fizmatlit, 2009.

8. Zeng, Z., L. Lian, K. Sammut, F. He, Y. Tang, and A. Lammas. "A survey on path planning for persistent autonomy of autonomous underwater vehicles." *Ocean Engineering* 110(A) (2015): 303–313. DOI: 10.1016/j.oceaneng.2015.10.007.

9. Kirsanov, Mihail Nikolaevich. "Analysis of algorithms for the selection of optimal routes the group's vessels." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 2(36) (2016): 183–190. DOI: 10.21821/2309-5180-2016-8-2-183-190.

10. Lazarowska, A. "Ship's trajectory planning for collision avoidance at sea based on ant colony otimisation" *Journal of Navigation* 68.2 (2015): 291–307. DOI: 10.1017/S0373463314000708.

11. Studenikin, D., A. Grigoryan, and N. Makovetskaya. "The use of decision support systems for choosing parameters of vessel's maneuvering." *Ekspluataciya morskogo transporta* 4 (2015): 58–62.

12. Mironenko, A. "Vessel's program motion model in restricted waters." *Mekhatronika, avtomatizatsiya, upravlenie* 2 (2013): 65–70.

13. Tam, Ch. K., R. Bucknall, and A. Greig. "Review of collision avoidance and path planning methods for ships in close range encounters." *Journal of Navigation* 62.3 (2009): 455–476. DOI: 10.1017/S0373463308005134.

14. Klyuev, V.V. "Ispol'zovanie teorii geometricheskikh veroyatnostei dlya otsenki pokazatelya stesnennosti akvatorii severnogo morskogo puti." *Navigatsiya i gidrografiya* 46 (2016): 20–28.

15. Plammer, K. J. *Manevrirovaniye sudov v uzkostyah*. L: Sudostroyeniye, 1986.

16. Lobanov, A. A., Yu. V. Rumyantsev, and D. M. Bukhov. "Metodicheskie aspekty proektnykh rabot po obespecheniyu navigatsionnoi bezopasnosti plavanii v sovremennykh usloviyakh." *Navigatsiya i gidrografiya* 35 (2013): 29–38.

17. *Obshchiye polozheniya ob ustanovlenii putey dvizheniya sudov.* № 9036. MO SSSR, 1987.

18. Taratynov, V. V. "Tselesoobraznost' razdeleniya morskikh putei." *Morskoi flot* 9 (1969): 19–20.

19. Taratynov, V. P. *Sudovozhdeniye v stesnennyh rayonah*. M: Transport, 1980.

20. Brodskii, P. G., Yu. V. Rumyantsev, and S. N. Nekrasov. "K voprosu otsenki vliyaniya intensivnosti sudokhodstva na avariinost'." *Navigatsiya i gidrografiya* 30 (2010): 36–42.

21. Weng, J., and S. Xue. "Ship collision frequency estimation in port fairways: a case study." *Journal of Navigation* 68.3 (2015): 602–618. DOI: 10.1017/S0373463314000885.

22. Wu, L. Y. Xu, Q. Wang, F. Wang, and Zh. Xu. "Mapping global shipping density from AIS data." *Journal of Navigation* 70.1 (2016): 67–81. DOI: 10.1017/S0373463316000345.

23. Smetanin, S. I., V. A. Ignatyuk, and A. A. Evstifeev. "Implementation of the software part of the system of satellite monitoring." *Information technologies* 21.6 (2015): 448–455.

24. MarineTraffic. Web. 1 Jun. 2017 <http://www.marinetraffic.com>.

25. Golovchenko, B.S., and V.M. Grinyak. "Information system for vessels traffic data capture." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova* 2(24) (2014): 156–162.

26. Grinyak, V. M., A. S. Anikeeva, N. Yu. Vasilchenko, and E. G. Gusev. "On numerical experiments for ship collision avoidance methods research." *Modern high technologies* 4-2 (2016): 230–234.

27. 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.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Гриняк Виктор Михайлович —
кандидат технических наук, доцент
Дальневосточный федеральный университет
690950, Российская Федерация, Владивосток,
ул. Суханова, 8
e-mail: *victor.grinyak@gmail.com*

Девятисильный Александр Сергеевич —
доктор технических наук
Институт автоматики и процессов управления
ДВО РАН,
690041, Российская Федерация, Владивосток,
ул. Радио, 5
e-mail: *devyatis@iacp.dvo.ru*

Люлько Виктор Иванович —
старший преподаватель
Владивостокский государственный университет
экономики и сервиса,
690014, Российская Федерация, Владивосток,
ул. Гоголя, 41
e-mail: *viktor.lulko@vvsu.ru*

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Grinyak, Victor M. —
PhD, associate professor
Far Eastern Federal University
8 Suhanova Str., Vladivostok, 690950,
Russian Federation
e-mail: *victor.grinyak@gmail.com*

Devyatisilnyi, Alexander S. —
Dr. of Technical Sciences
Institute of Automation and Control Processes, Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences
5 Radio Str., Vladivostok, 690041,
Russian Federation
e-mail: *devyatis@iacp.dvo.ru*

Lulko, Victor I. —
Senior Lecturer
Vladivostok State University of Economics and Service
41 Gogolya Str., Vladivostok, 690014,
Russian Federation
e-mail: *devyatis@iacp.dvo.ru*

Статья поступила в редакцию 13 июня 2017 г.
Received: June 13, 2017.

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

DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-4-691-703

SOME FEATURES OF PASSAGE STRAIT WITH FAST TIDAL STREAM (STRAIT FOR EXAMPLE – PENTLAND FIRTH)

S. V. Ermakov

Baltic Fishing Fleet State Academy FSBEI HE «KSTU», Kaliningrad, Russian Federation

The purpose of this article is to determine the features of navigation of vessels in straits with extreme hydrological regime and to justify recommendations to navigators for preventing casualties and incidents in such straits.

An analysis of various sources (maps, sailing directions, atlases), which contain information about the speed of tidal streams in the Pentland Firth strait, which connects the North Sea and the Atlantic Ocean, determined that the rate can reach 16 knots, and the normal of rate matter extremely difficult navigation in the strait.

Basis of the analysis of some features of the passage of vessels through Pentland Firth amounted the results of investigation of cement carrier «Cemfjord» accident, which took place in the strait of January 2, 2015. The vessel proceeded through the strait on maximum of favourable tidal stream with a speed over ground comparable to the flow rate, while the relative speed was so small that the vessel had lost handling, spun his lag to the wave, and capsized.

Analysis of the accident brought to the fore a number of well-known problems associated with the movement in similar straits and are subject to reconsideration on the background of the accident of cement carrier and its catastrophic consequences. These problems include: poor voyage planning, the neglect of the need to correct the plan when conditions of navigation are changing, the overvaluation of possibility of the ship regards its handling, commercial pressures, inadequate organization of vessel traffic in the strait. At the same time human factor is an umbrella for these problems.

The lessons learned from the accident and recommendations formulated in the course of its analysis and associated with the identified features of navigation in the strait (in particular related to the constant monitoring of the speed of the vessel, providing an approach to the strait in favorable conditions) allows to prevent the very serious marine casualties vessels intending to flow through the straits with fast tidal streams.

Keywords: tidal streams, Pentland Firth strait, navigation, features.

For citation:
Ermakov, Sergey V. "Some features of passage strait with fast tidal stream (strait for example – Pentland Firth)." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova* 9.4 (2017): 691–703. DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-4-691-703.

УДК 656.61.052

НЕКОТОРЫЕ ОСОБЕННОСТИ ПРОХОЖДЕНИЯ ПРОЛИВОВ С СИЛЬНЫМИ ПРИЛИВО-ОТЛИВНЫМИ ТЕЧЕНИЯМИ (НА ПРИМЕРЕ ПРОЛИВА ПЕНТЛЕНД-ФЕРТ)

С. В. Ермаков

Балтийская государственная академия рыбопромыслового флота ФГБОУ ВО «КГТУ», Калининград, Российская Федерация

Целью настоящей статьи является определение особенностей плавания судов в проливах с экстремальным гидрологическим режимом и обоснование рекомендаций судоводителям по предупреждению аварий и инцидентов в подобных проливах.

В результате анализа различных источников (карт, лоций, атласов), содержащих информацию о скорости приливо-отливных течений в проливе Пентленд-Ферт, соединяющем Северное море и Атлантический океан, было определено, что скорость течения может достигать 16 уз, а обычная для пролива скорость имеет значения, крайне затрудняющие навигацию в проливе.

В основу анализа некоторых особенностей прохождения судами пролива Пентленд-Ферт были положены результаты расследования аварии цементовоза «Cemfjord», произошедшей в проливе 2 января

2015 г. Судно следовало в проливе на максимуме попутного течения и со скоростью относительно грунта, сопоставимой со скоростью течения, при этом скорость относительно воды была настолько мала, что судно потеряло управляемость, его развернуло практически лагом к волне, и оно опрокинулось.

Анализ аварии вывел на первый план ряд известных проблем, связанных с движением в подобных проливах и подлежащих переосмыслению на фоне аварии цементовоза и ее катастрофических последствий. К числу этих проблем относятся: неудовлетворительное планирование перехода, пренебрежение необходимостью коррекции плана при изменении условий плавания, переоценка возможности судна в части, касающейся его управляемости, коммерческое давление, неадекватная организация движения судов в проливе. При этом человеческий фактор является обобщающим для большинства указанных проблем элементом.

Уроки, извлеченные из аварии, и рекомендации, сформулированные в процессе её анализа и связанные с выявленными особенностями навигации в проливе (в частности, в отношении мониторинга скорости судна, обеспечивающего подход к проливу в благоприятных условиях), позволят в будущем предупредить очень серьезные морские аварии судов, планирующих свое движение через проливы с сильными приливо-отливными течениями.

Ключевые слова: приливо-отливные течения, пролив Пентленд-Ферт, навигация, особенности.

Для цитирования:
Ермаков С. В. Некоторые особенности прохождения проливов с сильными приливо-отливными течениями (на примере пролива Пентленд-Ферт) / С. В. Ермаков // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2017. — Т. 9. — № 4. — С. 691–703. DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-4-691-703.

Введение

Морская судоходная отрасль XXI века — это постоянно растущие общий тоннаж флота, скорости и размеры судов, и, следовательно, плотность и интенсивность их движения в наиболее «популярных» акваториях Мирового океана [1]. В таких условиях все большее значение для безопасности плавания судна приобретает грамотное и соответствующее всем правилам и рекомендациям планирование перехода, подтверждением чему служат многочисленные исследования, объектом которых является планирование рейса, а предметом — различные его аспекты [2] – [6], в том числе связанные с приливо-отливными явлениями [7].

Нередко от судоводителя требуется осуществление предварительной прокладки таким образом, что линия пути судна проходит через проливы с сильными (до 15 уз) приливо-отливными течениями. Вместе с тем Резолюция ИМО А.893(21) «Руководство по планированию рейса» требует от судоводителя обязательного учета приливо-отливных течений при планировании рейса и связанных с ними изменений скорости на пути [8].

Одним из проливов со значительными приливо-отливными течениями является вытянутый с запада на восток пролив Пентленд-Ферт (Pentland Firth) между островом Великобритания и Оркнейским архипелагом, соединяющий северную часть Северного моря с Атлантическим океаном. Альтернативный маршрут из Северного моря в Атлантический океан (или наоборот) пролегает через пролив Ла-Манш [9]. Однако очевидны как минимум две причины, побуждающие капитанов планировать путь судна через пролив Пентленд-Ферт:

– путь через Ла-Манш является более протяженным, что приводит к увеличению времени перехода;

– интенсивность и плотность движения судов в проливе Ла-Манш в несколько раз выше, чем в проливе Пентленд-Ферт.

Очевидно, что различные пособия (в первую очередь лоции) содержат правила и рекомендации по прохождению пролива, включая указание наиболее оптимальных промежутков времени. Вместе с тем некоторые частные особенности навигации в проливе Пентленд-Ферт и на подходах к нему, которые следуют из опубликованных правил и рекомендаций, степень их императивности, возможные негативные последствия невыполнения рекомендуемых или обязательных действий можно оценить только по результатам анализа аварий и инцидентов, которые имели место с судами при их плавании этим «быстрым» проливом. Выводы такого анализа являются, по сути,

толкованием правил и рекомендаций как норм права [10] – [14], несущим не меньшую, чем сами правила, смысловую нагрузку.

Методы и материалы

Для выявления особенностей следования морским судном пролива с сильным приливо-отливным течением необходимо проанализировать конкретную аварию, которая в контексте настоящего исследования будет являться удаленным натурным экспериментом, где условия устанавливает и меняет сама природа. Площадкой для такого эксперимента является пролив Пентленд-Ферт (Pentland Firth), который отделяет Оркнейские острова от северного берега острова Великобритания и является кратчайшим путем из Атлантического океана в северную часть Северного моря. Кроме того, из этого пролива ведет наиболее широкий и безопасный проход в залив Скапа-Флоу [15].

Западной границей пролива считается линия, соединяющая мыс Даннет-Хед (58°39′N, 3°22′ W) и расположенный в 6,8 милях к NNE от него мыс Тор-Несс (рис. 1). Восточная граница проходит по линии, соединяющей мыс Данкенсби-Хед (58°39′ N, 3°22′ W) и находящийся в 6,5 милях к NNE от него мыс Олд-Хед [15].



Рис. 1. Пролив Пентленд-Ферт на карте 22207

Берега пролива преимущественно высокие, обрывистые и приглубые. Южные берега островов Хой и Саут-Раналдсей холмистые: высота отдельных холмов, поднимающихся на 1 – 2 мили от берега, достигает 50 – 60 м. Северный берег острова Великобритания более высокий, здесь холмы высотой более 100 м удалены более чем на полмили от берега. По мере продвижения на восток высота этого берега уменьшается до 45 – 50 м [15].

В средней части пролива лежат острова Строма и Суона. Проход между этими островами, называемый *Аутер-саунд*, чист от опасностей. Этим проходом в основном пользуются при плавании из Атлантического океана в Северное море.

Проход между островом Строма и берегом Шотландии называется *Иннер-саунд*. Он значительно уже, чем проход Аутер-саунд, и в нем имеются опасные для плавания банки и отмели. К северу от острова Суона расположен район подхода к заливу Скапа-Флоу с юга. Этот район находится в стороне от пути движения судов по проливу Пентленд-Ферт. У входа в пролив лежит группа островов и скал Пентленд-Скеррис, с севера и юго-запада от которой находятся широкие и чистые от опасности проходы. Глубины в судоходной части пролива Пентленд-Ферт составляют

50 – 80 м, к берегам они постепенно уменьшаются. В проливе разбросаны скалистые банки с глубинами 7,4 – 22 м. Грунт — повсеместно скала [15].

Приливные течения в проливе Пентленд-Ферт весьма разнообразны. Приливное течение на северной стороне пролива Пентленд-Ферт у мыса Тор-Несс начинается за 5 ч 30 мин до момента полной воды в порту Дувр; скорость сизигийного течения составляет по данным лоции [15] 6 уз.

Течение в начале направлено на восток, но по мере продвижения вдоль берега Хой разветвляется. Одна ветвь этого течения направлена на ESE, другая — к проходу Аутер-Саунд и далее идет на восток. Еще одна ветвь, следуя на ENE по проходу между островом Суона и полуостровом Саут-Уолс, соединяется с течениями, выходящими из проливов Кантик-Саунд и Хокса-Саунд, и оттесняется ими к SWS от берега, образуя водоворот. Вблизи полуострова Саус-Уолс северная ветвь сизигийного течения имеет скорость 4 – 5 уз и несколько меньше у острова Суона [15].

Севернее острова Суона течение поворачивает на восток, далее следуя на юго-восток между островом Суона и юго-западным берегом острова Саут-Рональдсей. В этом районе приливное течение начинается в то же время, что и у мыса Тор-Несс, а скорость сизигийного течения достигает 8 уз (по данным лоции [15]). Это течение огибает мыс Браф-Несс и соединяется с ветвью течения, идущего из прохода Аутер-Саунд, а далее следует в проход между южным берегом острова Саут-Роналдсей и островами Пентленд-Скеррис. В месте слияния течений к юго-востоку от острова Суона в сизигию образуется водоворот, который постепенно распространяется на 1,8 мили к SE от острова Суона. В этом районе начало течения начинается за 6 ч до момента полной воды в порту Дувр.

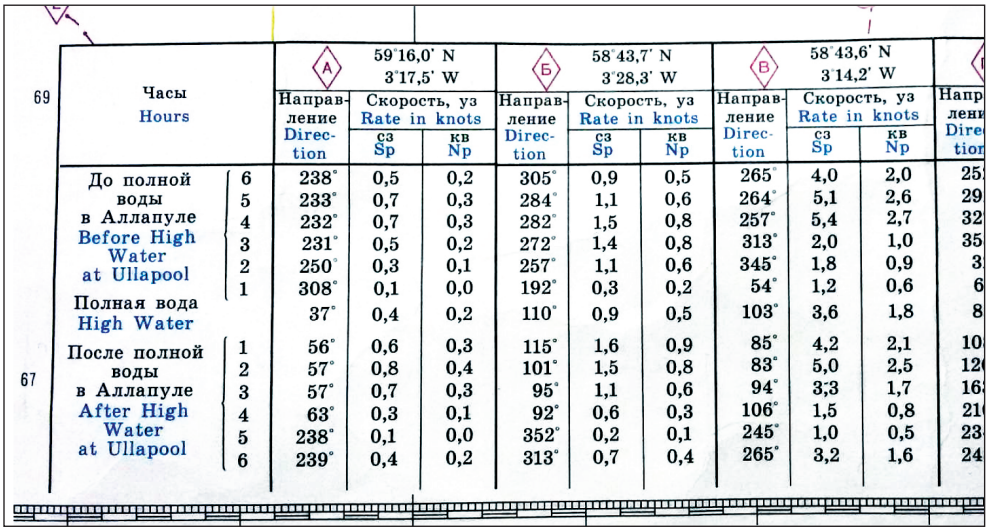
Отливное (западное) течение в проходе между южным берегом острова Саут-Роналдсей и островами Пентленд-Скеррис начинается в момент полной воды в порту Дувр. К югу от мыса Брафф-Несс это течение делится на две ветви: южная ветвь направляется в проход Аутер-Саунд, а северная следует на северо-запад между юго-западным берегом острова Саут-Роналдсей и островом Суона. Скорость северной ветви сизигийного течения в указанном проходе составляет 6 уз, начало течения наблюдается спустя 35 мин после полной воды в порту Дувр [15].

К северу от острова Суона это течение поворачивает на запад, а затем на WSW, направляясь в проход между островом Суона и южным берегом полуострова Саут-Уолс, где оно начинается через полчаса после момента полной воды в порту Дувр. Скорость отливного сизигийного течения у полуострова Саут-Уоллс не превышает 3 уз. От упомянутого прохода течение поворачивает на запад и, сливаясь с течением, выходящим из прохода Аутер-Саунд, устремляется к мысу Тор-Несс, постепенно увеличивая скорость. В месте слияния этих течений к северо-западу от острова Суона в сизигию образуются водовороты и сулои. Отливное течение у мыса Тор-Несс начинается спустя полчаса после начала его у северо-восточного входа в пролив Пентленд-Ферт, а скорость сизигийного течения достигает 6 – 7 уз. Из представленного описания можно выделить максимальную скорость течения в проливе, равную 8 уз. Иные официальные источники содержат другую информацию о скорости течения в проливе Пентленд-Ферт.

Как на российских морских навигационных картах издания ГУНиО, так и на адмиралтейских картах используют два способа представления приливо-отливных течений. Первый из них — приливные ромбы (Tidal Diamonds). Данные о приливных течениях в нужном районе приводят в таблице в углу карты. Соответствующую точку на карте выделяют «приливным ромбом», а в таблице указывают скорость и направление течения в этой точке с привязкой по времени к моменту наступления полной воды в порту отсчета. В таблицах указывают два значения скорости: для сизигийного и квадратурного приливов, поэтому судоводитель должен использовать в расчетах некоторую среднюю величину.

На рис. 2, где изображен фрагмент карты 22207, представлены два ромба (Б и В), которые несут информацию о приливо-отливных течениях в точках своего размещения с привязкой к полной воде в порту Аллапул. Непосредственно информация о скорости и направлении течения представлена в таблице в правом нижнем углу карты (см. рис. 2). На картах более крупного масштаба (например, 24218) используется представление информации о приливо-отливных течениях в виде

стрелок (рис. 3), причем стрелки с «оперениями» относятся к приливному течению, а без «оперений» — к отливному. Над стрелками указывается максимальная скорость сизигийного течения.



Часы Hours		A 59°16,0′ N 3°17,5′ W			Б 58°43,7′ N 3°28,3′ W			В 58°43,6′ N 3°14,2′ W		
		Направление Direction	Скорость, уз Rate in knots		Направление Direction	Скорость, уз Rate in knots		Направление Direction	Скорость, уз Rate in knots	
			сз Sp	кв Np		сз Sp	кв Np		сз Sp	кв Np
До полной воды в Аллапуле Before High Water at Ullapool	6	238°	0,5	0,2	305°	0,9	0,5	265°	4,0	2,0
	5	233°	0,7	0,3	284°	1,1	0,6	264°	5,1	2,6
	4	232°	0,7	0,3	282°	1,5	0,8	257°	5,4	2,7
	3	231°	0,5	0,2	272°	1,4	0,8	313°	2,0	1,0
	2	250°	0,3	0,1	257°	1,1	0,6	345°	1,8	0,9
	1	308°	0,1	0,0	192°	0,3	0,2	54°	1,2	0,6
Полная вода High Water		37°	0,4	0,2	110°	0,9	0,5	103°	3,6	1,8
После полной воды в Аллапуле After High Water at Ullapool	1	56°	0,6	0,3	115°	1,6	0,9	85°	4,2	2,1
	2	57°	0,8	0,4	101°	1,5	0,8	83°	5,0	2,5
	3	57°	0,7	0,3	95°	1,1	0,6	94°	3,3	1,7
	4	63°	0,3	0,1	92°	0,6	0,3	106°	1,5	0,8
	5	238°	0,1	0,0	352°	0,2	0,1	245°	1,0	0,5
	6	239°	0,4	0,2	313°	0,7	0,4	265°	3,2	1,6

Рис. 2. Фрагмент таблицы, содержащей информацию о приливо-отливных течениях, размещенной на карте 22207

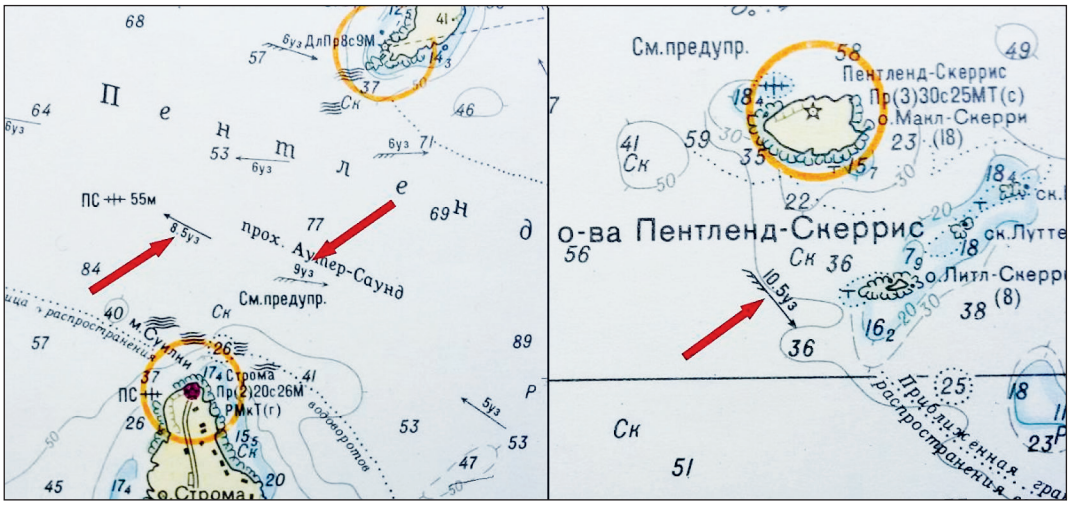


Рис. 3. Максимальные скорости течений в проливе Пентленд-Ферт на карте 24218

Анализ информации о приливо-отливных течениях, представленной на картах 22207 и 24218, позволяет определить следующие максимальные значения скорости течения и соответствующие им места в проливе: в проходе Аутер-Саунд скорость течения достигает 8,5 – 9 уз, а около острова Литл-Скерри — 10,5 уз.

Кроме лоций и морских навигационных карт, сведения о приливо-отливных течениях содержатся в специальных российских и английских (адмиралтейских) атласах. Так, в «Атласе приливо-отливных течений Северного и Ирландского морей» (адм. 6204) [16] наиболее интересны с точки зрения анализа экстремальных значений скорости течения справочная карта скоростей максимальных течений и почасовые карты течений прибрежных районов для Оркнейских островов. Первая из них предназначена для информирования мореплавателей о средних сизигийных течениях во время их наибольшей скорости. Если период сизигийных течений совпадает с периодом, когда Луна находится в перигее, то значение средней сизигийной скорости возрастает на 12 – 16 %. Если эти условия совпадают и со временем равноденствия, то значение средней сизигийной

скорости увеличивается на 18 – 23 %. В период апогея Луны и солнцестояний значение средней сизигийной скорости максимальных течений уменьшается на такие же величины.

Скорость максимальных приливо-отливных течений дана для навигационного слоя и показана изолиниями, а также выделена отдельными (красными) точками с наибольшими значениями. Наибольшее из максимальных значений скорости течения, представленное на описанной справочной карте для пролива Пентленд-Ферт составляет 12,4 уз, но может достигать, исходя из приведенного выше условия коррекции на положении Луны и Солнца, и больших значений.

Почасовые карты «Течения прибрежных районов» предназначены для определения элементов течения в любой момент времени в отдельных районах, важных в навигационном отношении (в том числе и в проливе Пентленд-Ферт). Эти карты более крупного масштаба и течения представлены на них подробнее, чем на картах первого раздела. Максимальное значение скоростей среднего сизигийного течения, которое можно извлечь из этих карт, составляет 10,0 уз. По аналогичному принципу построены карты приливо-отливных течений пролива Пентленд-Ферт в Адмиралтейском атласе Admiralty Tidal Stream Atlas (Orkney And Shetland Islands NP-209 [17]).

В настоящее время существуют и электронные общепризнанные инструменты, используемые для навигационной оценки приливов и отливов. Так, Гидрографическая служба Великобритании (United Kingdom Hydrographic Office – UKHO [18]) предлагает к использованию специальную компьютерную программу — Admiralty Total Tide (ATT), которая предназначена для прогноза приливо-отливных явлений в более чем 7000 портах мира и определения скорости и направления приливо-отливных течений более чем в 3000 точках.

Разность значений максимальных скоростей, полученных из различных источников (карт, лоций, Атласов), объясняется в первую очередь различием в принципах указания скорости, которая может быть средним из сизигийных значений, средним между сизигийным и квадратурным значениями и т. д. Таким образом, скорость приливо-отливного течения в проливе Пентленд-Ферт может превышать 10 уз, а значения из промежутка 5 – 10 уз являются обычным явлением. В американской лоции Шотландии [19] указано, что в западной части пролива скорость течения может временами достигать 16 уз.

Очевидно, что прохождение пролива при сильном встречном течении становится практически невозможным, особенно для судов с маломощной энергетической установкой. Однако и попутное течение не является прямым показанием для входа в пролив. Наиболее ярким доказательством этого является гибель цементовоза «Cemfjord» (водоизмещение 1850 т, длина 83,8 м), произошедшая 2 января 2015 г. [20].

В 13:00 30 декабря 2014 г. судно «Cemfjord», загруженное 2084 т цемента, вышло из порта Рордал (Дания) и направилось в британский порт Ранкорн (рис. 4).

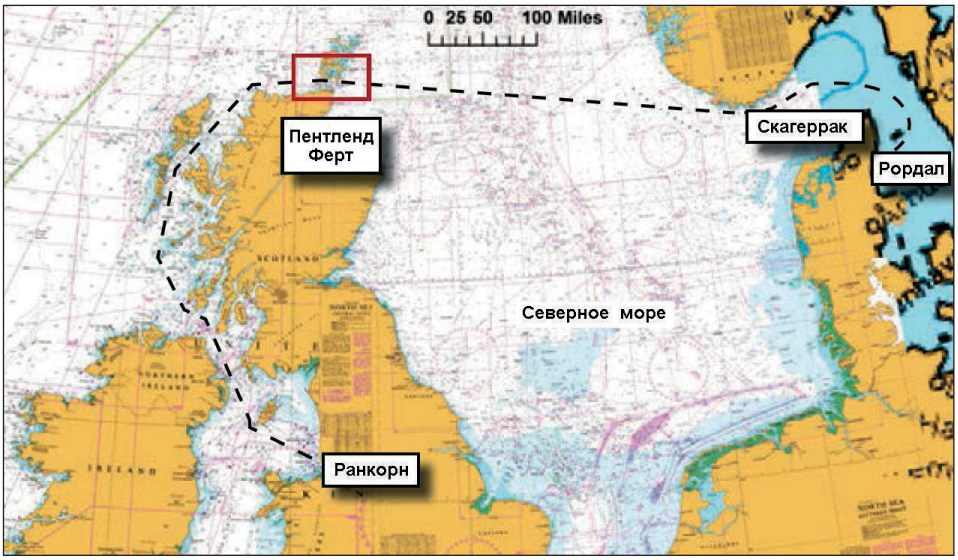


Рис. 4. Запланированный маршрут судна

Для судов, следующих из порта Рордал в порт Ранкорн, протяженность прямого маршрута через пролив Пентленд-Ферт составляет 981 милю. Альтернативный маршрут через пролив Ла-Манш длиннее на 206 миль. До выхода в Северное море судно шло со средней скоростью 9,2 уз.

31 декабря в 07:15 капитан сообщил фрахтователю, что расчетное время прибытия к приемному бую порта Ливерпуль 04:00 4 января 2015 г. При выходе из пролива Скагеррак судно начало движение прямым курсом через Северное море в постоянно ухудшающихся погодных условиях.

1 января капитан сдвинул расчетное время прибытия сначала на 06:00, а потом и на 16:00. Средняя скорость судна в первые сутки следования Северным морем составляла 6,8 уз.

2 января 2015 г. в 04:09 судно находилось приблизительно в 43 милях от востока к входу в пролив, и впервые было обнаружено британской станцией АИС наземного базирования (рис. 5). В 07:21 капитан сообщил фрахтователю, что расчетное время прибытия 02:00 5 января. В 10:52 капитан связался с Береговой охраной (см. рис. 5) и сообщил о том, что на 11:00 средняя скорость за последние 24 ч составила 5,8 уз.

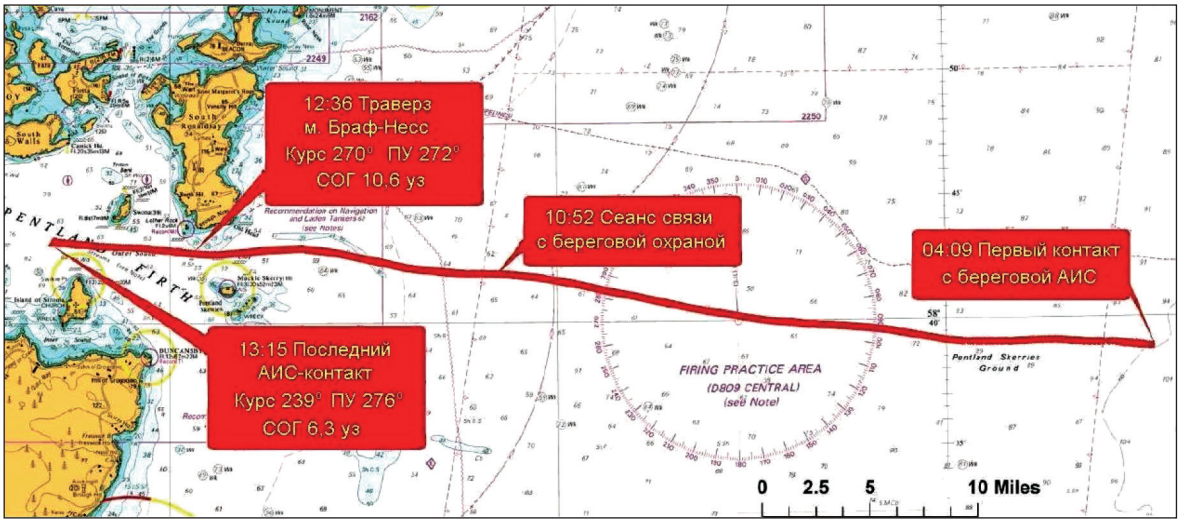


Рис. 5. АИС-траектория судна с отметками моментов АИС-обнаружения, УКВ-контакта, прохождения мыса Браф-Несс и последнего АИС-контакта

Сразу после полудня судно «Cemfjord» настолько приблизилось к побережью Великобритании, что капитан и старпом смогли связаться со своими семьями по мобильной связи.

После того, как в 12:36 судно, следуя курсом 270° и абсолютной скоростью 10,6 уз, прошло мыс Браф-Несс и вошло в пролив, оно только однажды было замечено другим судном — паромом «Pentalina», следовавшим с юга Оркнейских островов к материковой части Шотландии. Кратчайшее сближение судов имело место в 12:48, когда паром «Pentalina» прошел в одной миле (чуть более) по носу «Cemfjord». С парома наблюдалось практически прямое положение судна, и лишь большие волны вызывали качку с малой амплитудой. В момент входа в пролив скорость попутного течения составляла 3,5 уз. Таким образом, судно относительно воды двигалось со скоростью 7 уз.

Результаты

В 13:15 был последний АИС-контакт с цементовозом «Cemfjord», согласно которому судно двигалось с путевым углом 276° , курсом 239° и абсолютной скоростью 6,3 уз, но течение к тому моменту уже «разогналось» до 6 уз. Следовательно, в течение промежутка времени менее 40 мин относительная скорость «Cemfjord» упала с 7 уз практически до нуля (рис. 6). Снижение скорости судна относительно воды при расследовании было оценено как действие, предпринятое капитаном (или старшим помощником) для снижения чрезмерной килевой качки и зарывания судна носом. Такое уменьшение относительной скорости могло привести в итоге к снижению потока воды на перо руля, и, как следствие, к потере управляемости. Совокупность влияния отливного течения, действующего

на судно, и снижения скорости судна привела к необходимости изменить курс влево для удержания судна на заданной линии пути. При этом курсовой угол волнения увеличился до 30º, продолжая увеличиваться далее. Таким образом, потерявшее управление судно оказалось под действием сильного лагового волнения, которое привело к опрокидыванию судна через левый борт. Повреждение носовой мачты свидетельствует о том, что судно испытывало сильные удары волн в носовую часть.

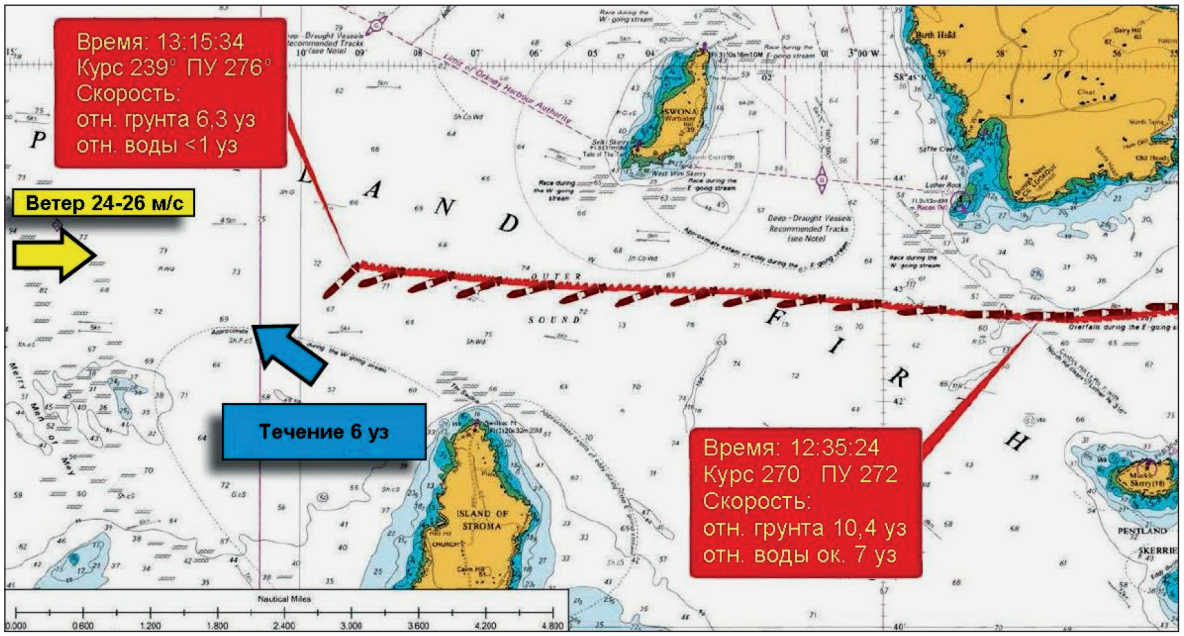


Рис. 6. Путь судна в проливе по данным АИС

Спустя 25 часов, 3 января в 14:16, впередсмотрящий парома «Hrossey», следовавшего из Леруика в Абердин, обнаружил на горизонте плавающий объект и доложил об этом капитану, который принял решение сблизиться с этим объектом. Сократив дистанцию, капитан парома опознал в объекте «Cemfjord» (рис. 7) и сразу сделал по УКВ-радиостанции доклад в береговую охрану, сообщив координаты цементовоза. В 15:00 с борта парома «Hrossey» наблюдался уход цементовоза под воду (см. рис. 7). Продолжительные поиски восьми членов экипажа положительных результатов не дали.



Рис. 7. Перевернутый корпус цементовоза «Cemfjord» после его обнаружения

В момент опрокидывания «Cemfjord» в проливе наблюдался западный ветер со скоростью 24 – 26 м/с, которая при порывах достигала 28 м/с (при одном наблюдении было зафиксировано 37 м/с). Высота волн достигала 10 м. Наблюдалось течение направлением 290º и скоростью 6 уз.

Обсуждение

За 2014 г. цементовоз «Cemfjord» под командованием одного и того же капитана восемь раз пересекал пролив Пентленд-Ферт в западном направлении. При этом у судна не раз возникали проблемы. Так, 6 марта в 12:09 цементовоз вынужден был развернуться, и только через 2 ч 7 мин он вошел в пролив. 31 марта с 06:58 до 09:29 цементовоз в ожидании отливного течения с минимальной скоростью маневрировал недалеко от входа в пролив. Однако в итоге начало движения в проливе происходило все равно против течения путевым углом 287° и абсолютной скоростью 1,3 уз. 17 мая в 07:48, находясь примерно в 9 милях от входа в пролив, цементовоз изменил свой курс влево, до 12:30 он дрейфовал в районе на юго-восток от островов Пентланд-Скеррис и только после этого вошел в пролив. 7 октября в 10:00, во избежание прохода по проливу против течения перед его входом, судно изменило курс влево, после чего из-за чрезмерного крена произошел сдвиг груза, и появилась реальная угроза опрокидывания. Балластировкой судно было выровнено, и капитан принял решение на вход в пролив.

Используя информацию «Атласа приливо-отливных течений», капитан цементовоза «Cemfjord» обычно планировал западный проход либо с первой, либо с последней стадией западного течения, чтобы следуя по попутной воде, обойти опасные быстрины течений, достигающие своего пика в момент времени 4 ч 20 мин после полной воды в порту Дувр. Режим течения, имевший место на моменты плавания и аварии цементовоза, представлен в таблице, из которой видно, что наиболее благоприятное время для прохода имело место в двух «окнах»: с 08:20 до 11:00 и с 14:26 до 17:00, а в 13:11 наступает самое опасное время нахождения в проливе на попутном течении.

Течение в проливе во время аварии цементовоза

Время (UTC)	Состояние течения
08:20	Затихание восточного течения
08:50	Полная вода в порту Дувр
09:21	Стоячая вода
11:00	Набирает силу западное течение
13:11	Течение набирает полную силу, наблюдается тяжелое волнение
14:26	На юго-востоке пролива течение начинает стихать, создавая благоприятные условия для входа в пролив с востока
15:54	Стоячая вода
17:00	Начинается восточное течение

Решение капитана войти в Пентленд-Ферт при неблагоприятных погодных условиях в итоге привело к катастрофическим последствиям для судна и экипажа. Капитан и старший помощник могли скорректировать время подхода к проливу или выбрать иной альтернативный маршрут. Очевидно, что решение капитана было обусловлено не опытом плавания в проливе Пертленд-Ферт, а иными причинами.

Первая возможность избежать плохой погоды появилась при получении прогноза на северо-западе Шотландии, который стал доступен, как только судно пересекло Северное море. Судно могло повернуть на юг через Ла-Манш или искать убежище к востоку от материковой части Шотландии. Однако маловероятно, что капитан принимал во внимание и рассматривал эту возможность.

Фрахтователь цементовоза требовал от судна в хорошую погоду движения со скоростью не менее 9 уз, что немногим меньше максимальной скорости. Судно направлялось на запад в постоянно ухудшающихся погодных условиях, поэтому скорость сокращалась, и капитан сообщил об изменении ожидаемого время прибытия в следующий порт. Капитан цементовоза имел репутацию целеустремленного и решительного лидера и дорожил своим авторитетом [20], поэтому он не рассматривал вариант с поиском убежища к востоку от материковой части Шотландии.

При предыдущих переходах при неблагоприятных для прохождения пролива условиях капитан в последний момент предпринимал действия по изменению курса или удержанию позиции, и судно дожидалось более благоприятных условий. Однако при последнем переходе на судне произошло близкое к критическому смещению груза, так как судно при изменении курса развернулось лагом к волне. Это обстоятельство повлияло на последующие действия капитана.

Во время начала вахты капитана, т. е. в 6:00 2 января, истинная скорость судна была 5 уз. Капитаном или старшим помощником была рассчитана скорость движения таким образом, чтобы судно вошло в проход Аутер-Саунд в наиболее благоприятных условиях, т. е. в 14:15 (рис. 8). Однако при подходе к проливу, из-за западного течения, скорость которого была близка к своему максимуму, судно двигалось намного быстрее, чем это было рассчитано (со скоростью относительно грунта, равной 11 уз). Это привело к прибытию судна в пролив Аутер-Саунд примерно на час раньше, чем было запланировано.

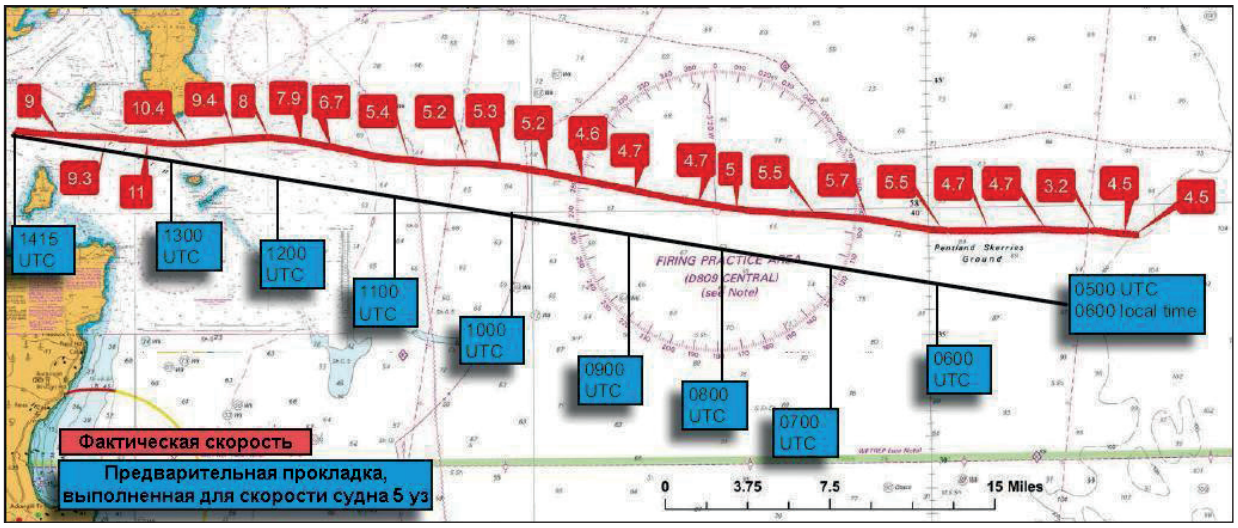


Рис. 8. Фактическая абсолютная скорость на подходе к проливу и рассчитанное ожидаемое время прихода в путевые точки при следовании со скоростью 5 уз

После входа в пролив был утрачен последний шанс предотвратить трагедию. Решение капитана на вход, скорее всего, было обусловлено его уверенностью в судне и западным (попутным) направлением течения. Наверняка осознавая всю степень опасности, связанной с течением в Пентленд-Ферт, капитан не смог в полной мере оценить тяжесть условий и совокупность факторов, имеющих место при западном шторме. С учетом прогнозов погоды и преобладающих приливов капитан должен был принять решение по отклонению на юг в поисках укрытия (в идеале, в заливе Синклера). Решение пройти через пролив Пентленд-Ферт явилось результатом неудовлетворительного планирования рейса, неточных расчетов, неадекватной оценки условий окружающей среды, чрезмерной уверенности в управляемости судна, и, главное, нежеланием изменить курс при сильном волнении.

Заключение

Приливо-отливные явления в Мировом океане являются фактором, очевидно влияющим на безопасность судоходства. Негативная составляющая этого влияния обусловлена в первую очередь большой, но предсказуемой динамикой этих явлений. Кроме непосредственно изменений уровня воды, приливы и отливы вызывают, порой, сильные и изменчивые течения, обязательный учет которых при планировании рейса определяется как теорией навигации и хорошей морской практикой, так и различными нормативно-правовыми актами императивного характера.

Пролив Пентленд-Ферт, являющийся своеобразной «горловиной» Северного моря, связывает его с Атлантическим океаном. Анализ различных официальных источников позволил выя-

вить часто повторяющиеся большие значения (5 – 10 уз) скорости течения, при этом максимальное из всех зафиксированных значений составляет 16 уз.

Подобный экстремальный гидрологический режим в проливе и на его подходах определяет для каждого судна некоторые особенности прохождения подобных проливов. Во-первых, следовать в проливе необходимо попутным течением, но таким образом, чтобы избежать времени наступления его максимальной скорости. Для этого необходимо входить в пролив в заранее рассчитанные оптимальные промежутки времени. Во-вторых, при движении в проливе необходимо осуществлять постоянный контроль относительной скорости движения, т. е. пользоваться не только приемником спутниковой навигации для регулирования скоростного режима судна, но и относительным лагом. В-третьих, при подходе к проливу в связи с изменчивостью скорости течения необходимо отслеживать и отрабатывать любое отклонение абсолютной скорости судна от заданного значения, чтобы избежать необходимости ожидания благоприятных условий на входе в пролив.

Для цементовоза «Cemfjord» потеря управляемости на сильном попутном течении привела к развороту судна лагом к волне и его опрокидыванию, которое произошло за такой короткий промежуток времени, что экипаж не смог ни покинуть судно, ни подать сигнал бедствия. Аварии можно было бы избежать, если бы судно вошло в пролив, дождавшись благоприятных условий, т. е. либо со стоячей водой, соответствующей полной воде в порте Дувр, либо за 1,5 – 2 ч до стоячей воды, соответствующей малой воде в порту Дувр. Использование для прохода пролива этих двух временных окон в совокупности с парой аналогичных временных окон для входа в пролив со стороны Атлантического океана сводит к возможному минимуму риск возникновения аварийной ситуации. Таким образом, при подходе к проливу цементовоз «Cemfjord» должен был ожидать благоприятных условий. Однако аварийная ситуация, связанная со смещением груза при постановке судна лагом к волне после изменения курса в сторону от входа в пролив, случившаяся с судном несколько ранее, а также «коммерческое давление» явились причиной отказа капитана от ожидания. Вместе с тем грамотное планирование рейса (или оперативная корректировка плана) в части, касающейся скорости движения судна, позволило бы войти в пролив без ожидания, с началом очередного временного окна.

Несмотря на то, что организация движения судов в проливе не является объектом представленного в статье исследования, необходимо заметить, что существующая процедура оперативного контроля судов, позволившая пропустить аварию цементовоза, должна быть пересмотрена таким образом, чтобы в итоге она обеспечивала наличие у береговых служб непрерывной информации о судах в проливе.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Ермаков С. В.* Методика сравнительного анализа критериев выявления промахов в измерениях навигационных параметров / С. В. Ермаков // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2016. — № 1 (35). — С. 15–23. DOI: 10.21821/2309-5180-2016-8-1-15-23.

2. *Вишневецкий С. А.* Анализ алгоритмов выбора пути судна при задании пространства клеточным графом / С. А. Вишневецкий // Вестник Государственного морского университета им. адмирала Ф. Ф. Ушакова. — 2014. — № 4 (9). — С. 24–30.

3. *Ершов А. А.* Совершенствование методов обеспечения безопасности штормового плавания судов / А. А. Ершов, А. В. Теренчук // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Морская техника и технология. — 2015. — № 3. — С. 7–13.

4. *Клементьев А. Н.* Обеспечение безопасности плавания современных судов смешанного плавания в стеснённых условиях / А. Н. Клементьев, М. Ю. Чурин // Вестник Волжской государственной академии водного транспорта. — 2015. — № 43. — С. 281–286.

5. *Матохин А. В.* Управление безопасной эксплуатацией судов в практике судоходных компаний / А. В. Матохин // Техника и технология. — 2013. — № 4. — С. 16–22.

6. *Чурин М. Ю.* Метод определения динамической просадки судов смешанного «река-море» плавания при движении на мелководье / М. Ю. Чурин // Современные проблемы науки и образования. — 2013. — № 5. — С. 62.

7. *Фёдорова Е. В.* Способ прогнозирования высоты уровня моря / Е. В. Федорова, Ю. Н. Жуков, Р. А. Исмаилов // Навигация и гидрография. — 2016. — № 43. — С. 28–34.

8. IMO Resolution A.893(21). Guidelines for voyage planning [Электронный ресурс]. — Режим доступа: http://www.imo.org/blast/blastData.asp?doc_id= 10712&filename=893%2821%29. PDF (дата обращения — 20.02.17).

9. *Клюев В. В.* Оценка рисков и управление рисками в практике судовождения / В. В. Клюев, С. И. Кондратьев, В. И. Тульчинский // Эксплуатация морского транспорта. — 2016. — № 3 (80). — С. 18–25.

10. *Беляева О. М.* Толкование норм права / О. М. Беляева // Ученые записки Казанского университета. Серия: Гуманитарные науки. — 2007. — Т. 149. — № 6. — С. 39–47.

11. *Вершинина С. И.* К вопросу о толковании норм права / С. И. Вершинина // Вектор науки Тольяттинского государственного университета. Серия: Юридические науки. — 2010. — № 2. — С. 36–39.

12. *Кравчик Б. В.* Толкование норм права / Б. В. Кравчик, Л. В. Бондаренко // Вестник магистратуры. — 2015. — № 2-3. — С. 16–18.

13. *Мыльников К. В.* Толкование норм права, как средства правореализации / К. В. Мыльников // Вестник ВЭГУ. — 2010. — № 5. — С. 132–137.

14. *Сафонов А. Ю.* Понятие логического толкования норм права / А. Ю. Сафонов // Адвокатская практика. — 2008. — № 1. — С. 44–48.

15. Лоция Фарерских, Шетландских, Оркнейских островов и северного берега острова Великобритания. Адм. № 1221. — СПб.: ГУНиО МО РФ, 2001. — 461 с.

16. Атлас приливо-отливных течений Северного и Ирландского морей. Адм. № 6204. — М.: ГУНиО МО СССР, 1970. — 48 с.

17. Admiralty Tidal Stream Atlas. Orkney And Shetland Islands (NP209). — UK Hydrographic Office, 2015.

18. *Алексеева Е. Г.* Зарубежный опыт управления навигационно-гидрографическим обеспечением судоходства / Е. Г Алексеева, Е. А. Лаврентьева // Эксплуатация морского транспорта. — 2013. — № 2 (72). — С. 13–18.

19. Sailing Directions (Enroute). Scotland (Pub. 141). — Fifteenth Edition. — US National Geospatial-Intelligence Agency, 2015.

20. Report on the investigation 8/2016 of the capsize and sinking of the cement carrier Cemfjord in the Pentland Firth, Scotland with the loss of all eight crew on 2 and 3 January 2015. — Southampton: Marine Accident Investigation Branch, 2016. — 113 p.

REFERENCES

1. Ermakov, Sergey Vladimirovich. “Method of comparative analysis of criteria for the identification outlier in the measurements navigation parameters.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova* 1(35) (2016): 15–23. DOI: 10.21821/2309-5180-2016-8-1-15-23.

2. Vishnevetskiy, S. A. “Analysis algorithms for choosing the route when setting the space of a cellular count.” *Vestnik gosudarstvennogo morskogo universiteta im. admirala F.F. Ushakova* 4(9) (2014): 24–30.

3. Ershov, Andrey Aleksandrovich, and Alexander Vladimirovich Terenchuk. “Improvement of the methods of ensuring safety of storm navigation of the ships.” *Vestnik of Astrakhan State Technical University. Series: Marine Engineering and Technologies* 3 (2015): 7–13.

4. Klementyev, A. N., and M. U. Churin. “Ensuring of navigation’s safety of «sea-river» going ships in congested water conditions.” *Vestnik Volzhskoj akademii vodnogo transporta* 43 (2015): 281–286.

5. Matokhin, A. V. “Upravlenie bezopasnoi ekspluatatsiei sudov v praktike sudokhodnykh kompanii.” *Tekhnika i tekhnologiya* 4 (2013): 16–22.

6. Churin, M. Yu. “The method of dynamic squat’s determination of sea-and-river-going ship.” *Modern problems of science and education* 5 (2013): 62.

7. Fedorova, E. V., Yu. N. Zhukov, and R. A. Ismailov. “Sposob prognozirovaniya vysoty urovnya moray.” *Navigatsiya i gidrografiya* 43 (2016): 28–34.

8. IMO Resolution A.893(21). Guidelines for voyage planning. Web. 20 Feb. 2017 <http://www.imo.org / blast/blastData.asp?doc_id= 10712&filename=893%2821%29. PDF>.

9. Klyuev, V. V., S. I. Kondratiev, and V. I. Tulchinskiy. "Risk Assessment and Risk Management in Navigation." *Jekspluatacija morskogo transporta* 3(80) (2016): 18–25.

10. Belyaeva, O. M. "Tolkovanie norm prava." *Uchenye zapiski Kazanskogo universiteta. Seriya: Gumanitarnye nauki* 149.6 (2007): 39–47.

11. Verchinina, Svetlana Ivanovna. "To a question on interpretation of norms of the right as an independent kind of legal activity." *Vektor nauki Tol' jattinskogo gosudarstvennogo universiteta. Serija: Juridicheskie nauki* 2 (2010): 36–39.

12. Kravchik, B. V., and L. V. Bondarenko. "Tolkovanie norm prava." *Vestnik magistratury* 2-3 (2015): 16–18.

13. Mylnikov, K. V. "Interpretation of legal rules as a means of exercise of rights." *Vestnik VEGU* 5 (2010): 132–137.

14. Safonov, A. Ju. "Ponjatie logicheskogo tolkovanija norm prava." *Advokatskaja praktika* 1 (2008): 44–48.

15. *Locija Farerskih, Shetlandskih, Orknejskih ostrovov i severnogo berega ostrova Velikobritanija. Adm. №1221.* SPb.: GUNiO MO RF, 2001.

16. *Atlas prilivo-otlivnyh techenij Severnogo i Irlandskogo morej. Adm. №6204*. M.: GUNiO MO SSSR, 1970.

17. *Admiralty Tidal Stream Atlas. Orkney And Shetland Islands (NP209).* UK Hydrographic Office, 2015.

18. Alekseeva, E. G., and E. A .Lavrentieva. "International experience in operation of the navigational and hydrographic support of the shipping." *Jekspluatacija morskogo transporta* 2(72) (2013): 13–18.

19. *Sailing Directions (Enroute). Scotland (Pub. 141).* Fifteenth Edition. US National Geospatial-Intelligence Agency, 2015.

20. *Report on the investigation 8/2016 of the capsize and sinking of the cement carrier Cemfjord in the Pentland Firth, Scotland with the loss of all eight crew on 2 and 3 January 2015.* Southampton: Marine Accident Investigation Branch, 2016.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Ермаков Сергей Владимирович —
старший преподаватель
Балтийская государственная академия
рыбопромыслового флота ФГБОУ ВО «КГТУ»
236035, Российская Федерация, Калининград,
ул. Молодежная, д. 6
e-mail: *esv.klgd@mail.ru*

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Ermakov, Sergey V. —
Senior Lecturer
Baltic Fishing Fleet State Academy
FSBEI HE «KSTU»
6 Molodezhnaya Str., Kaliningrad, 236035,
Russian Federation
e-mail: *esv.klgd@mail.ru*

Статья поступила в редакцию 27 февраля 2017 г.
Received: February 27, 2017.

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

DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-4-704-713

DEVELOPING THE MODEL FOR STUDY OF TERMINAL ZONING IMPACT ON ITS OPERATING EFFICIENCY

A. A. Yanchenko[1], T. E. Malikova[2], I. N. Volnov[1]

[1] — Vladivostok Branch of the Russian Customs Academy,
Vladivostok, Russian Federation
[2] — Maritime State University named after Admiral G. I. Nevelskoi,
Vladivostok, Russian Federation

The paper, based on the study of current logistic processes of container terminal which is characterized by dynamic variability and need to take into account the variability of parameters, describes the process of developing the model for handling container import cargo flows. The developed model makes it possible to reproduce the behavior of the system under study and determine the ultimate possibilities for processing cargoes under the use of both the institution of the preliminary informing of customs authorities and logistic technology of container terminal zoning. To implement the simulation model the authors make the system analysis of the technology for handling import container cargo flow at the sea port. At the same time, the unloading operations and placement of containers in storage areas, customs clearance procedures and customs control of both inbound vessel and cargo and release of containers according to the customs procedure declared are considered as the single process.The characteristic feature of the process under consideration is the transfer of the part of the operations relating to the customs clearance and customs control of the container flow even before vessel's arrival at seaport, which provides logistic advances in commodity supply chain. In particular, the possibility of implementing logistic technology for zoning the territory of the container terminal according to the Pareto principle, that is setting up the "cold" and "hot" zones. As a result of the study, the flowchart for processing import container cargo flow with the use of technology of terminal zoning in the technological process as a system of massive handling is developed. The present massive handling system flowchart can be used for constructing discrete event-driven simulation of the import container flow handling process at the seaport on the platform of the relevant specific software.

Keywords: container shipping, marine transport, cargo handling process, preliminary informing, simulation modeling.

For citation:
Yanchenko, Anna A., Tatiana E. Malikova, and Igor N. Volnov. "Developing the model for study of terminal zoning impact on its operating efficiency." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 9.4 (2017): 704–713. DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-4-704-713.

УДК 656.073.235: 656.073.28

РАЗРАБОТКА МОДЕЛИ ИССЛЕДОВАНИЯ ВЛИЯНИЯ ЗОНИРОВАНИЯ КОНТЕЙНЕРНОГО ТЕРМИНАЛА НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ ЕГО РАБОТЫ

А. А. Янченко[1], Т. Е. Маликова[2], И. Н. Вольнов[1]

[1] — Владивостокский филиал Российской таможенной академии,
Владивосток, Российская Федерация
[2] — Морской государственный университет имени адмирала Г. И. Невельского,
Владивосток, Российская Федерация

В статье на основе изучения современных логистических процессов контейнерного терминала, характеризующихся динамической изменчивостью и необходимостью учета разнородных параметров, представлен процесс построения модели переработки импортных контейнерных грузопотоков. Разработанная модель позволяет воспроизвести поведение исследуемой системы и определить предельные возможности переработки грузов в условиях применения института предварительного информирования таможенных органов и логистической технологии зонирования контейнерного терминала. С целью реализации имитационной модели был проведен системный анализ технологии переработки импортного контейнерного потока в порту. При этом в виде единого технологического процесса были рассмотрены операции по выгрузке

и размещению контейнеров в зоне хранения, операции, связанные с проведением таможенного оформления и таможенного контроля судна, а также прибывшего на нем груза и выпуска контейнеров в соответствии с заявленной таможенной процедурой. Отличительной особенностью рассматриваемого процесса является перенос части операций, связанных с таможенным оформлением и таможенным контролем контейнерного потока, еще до прибытия судна в порт, что дает определенные логистические преимущества в цепи поставки товаров (в частности, возможность реализации логистической технологии зонирования территории контейнерного терминала по принципу Парето на «холодную» и «горячую» зоны).

В результате выполненного исследования была разработана блок-схема переработки импортного контейнерного потока с применением технологии зонирования терминала в технологическом процессе в виде системы массового обслуживания. Представленная блок-схема системы массового обслуживания может быть использована для построения дискретно-событийной имитационной модели процесса переработки импортного контейнерного потока в порту на платформе соответствующего специализированного программного обеспечения.

Ключевые слова: контейнерные перевозки, морской транспорт, процесс грузопереработки, предварительное информирование, имитационное моделирование.

Для цитирования:
Янченко А. А. Разработка модели исследования влияния зонирования контейнерного терминала на эффективность его работы / А. А. Янченко, Т. Е. Маликова, И. Н. Вольнов // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2017. — Т. 9. — № 4. — С. 704–713. DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-4-704-713.

Введение (Introduction)

В связи с осуществлением хозяйственной деятельности ОАО «Владивостокский торговый порт» (ОАО «ВМТП»), в соответствии с действием Федерального закона «О свободном порте Владивосток» от 13.07.2015 № 212-ФЗ [1], для судов, перевозящих импортные грузы в контейнерах, введено обязательное предварительное информирование таможенных органов [2] – [5], которое дает определенное логистическое преимущество в цепи поставки товаров, так как еще до постановки судна под разгрузку по каждой прибывшей контейнерной партии таможенным органом (ТО) уже принято предварительное решение по системе управления рисками (СУР) о том, какие формы таможенного контроля нужно проводить, назначен ли таможенный осмотр или досмотр [6] – [8]. В результате реализации пилотного проекта применения института предварительного информирования в морском порту Владивосток срок фактического пребывания контейнеров на терминале сократился на 4,5 сут [9].

В связи с этим представляет практический интерес возможность реализации технологии, применяемой в складской логистике, а именно разделение площади импортной зоны контейнерного терминала по принципу Парето на «холодную» и «горячую» зоны. В «горячей» зоне будут располагаться контейнеры с товаром, по которым назначен таможенный осмотр или досмотр (около 20 % от прибывающего контейнерного потока), в «холодной» зоне — остальные 80 %, к которым у таможенных органов нет претензий [10].

Методы и материалы (Methods and Materials)

Предварительные расчеты экономической эффективности предлагаемого варианта изменения логистического потока на контейнерном терминале выполнялись с использованием сетевых графиков. Критерием оптимальности было выбрано время прохождение товарной партии в количестве пяти контейнеров по логистической цепи. Результаты анализа сетевых графиков представлены в статье [11]. Преимущество зонирования по принципу Парето для контейнерного терминала заключается в оптимизации маршрутов движения погрузочно-разгрузочной техники, сокращении количества операций, выполняемых с контейнерами в зоне хранения, и времени на выставление контейнерной партии товара для проведения таможенного осмотра или досмотра (время подготовки одной товарной партии из пяти контейнеров к осмотру сокращается на 0,4 ч). Следует отметить, что оптимизация маршрутов движения погрузочно-разгрузочной техники достигнута за счет расположения «горячей» зоны вблизи осмотровой (досмотровой) площадки контейнерного терминала.

Одним из направлений исследования является разработка моделей и формальных методов, которые позволяют оценить степень влияния предварительного информирования на ускорение технологического процесса с момента выгрузки до фактического вывоза контейнеров с территории порта [12]. В качестве метода исследования было выбрано имитационное моделирование, так как данный математический аппарат позволяет воспроизвести поведение исследуемой системы на основе результатов анализа наиболее существенных взаимосвязей между ее элементами и определить предельные возможности (сроки) переработки грузов в условиях применения технологии предварительного информирования таможенных органов.

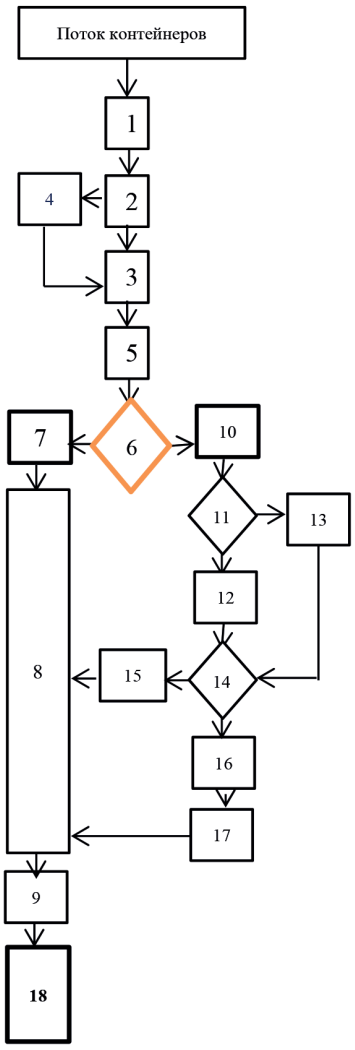
Моделирование является общепризнанным инструментом поддержки принятия решений в управлении логистическими потоками на транспорте. Его возможности были использованы и хорошо зарекомендовали себя при анализе деятельности транспортных и портовых систем в исследованиях А. Л. Кузнецова, В. А. Погодина, С. С. Павленко, В. Н. Щербаковой-Слюсаренко, А. С. Балалаева, Р. Г. Король, Н. Н. Майорова, А. В. Кириченко, В. А. Фетисова, И. В. Кукушкина и др. В статье [13] разработанная имитационная модель сетей контейнерного грузораспределения позволила определить суммарные конечные затраты грузоотправителей в различных рыночных условиях с учетом варьирования объема отправок продукции, периодичности и географии отправок. В статье [14] рассмотрено применение системного подхода к описанию транспортного узла, внесено предложение о разработке специализированных транспортных моделей с использованием имитационного моделирования, а также рассмотрен фрагмент транспортной модели контейнерного терминала. В работах [15] – [19] разработаны следующие модели: имитационная модель системы «железнодорожная станция — морской порт», дискретно-событийная имитационная модель работы припортовой железнодорожной станции и порта, имитационная модель системы массового обслуживания (СМО) импортного грузопотока с применением технологии предварительного информирования таможенных органов, имитационная модель процесса переработки каботажных грузов.

Сравнительный анализ результатов исследований данных авторов послужил отправной точкой для разработки имитационной модели СМО импортного контейнерного потока в порту с применением технологии зонирования территории контейнерного терминала.

Результаты (Results)

В качестве инструмента для исследования эффективности предложенного мероприятия необходимо разработать имитационную модель, позволяющую оценить степень влияния зонирования территории контейнерного терминала на ускорение процесса обработки импортных контейнеропотоков с момента прибытия до фактического вывоза из порта. По своей форме моделирование на современном этапе представляет собой процедуру потоковых вычислений. Как сказано в статье [20, с. 95], в потоковых архитектурах для описания вычислений используется ориентированный граф, состоящий из вершин (узлов), отображающих операции, и ребер, показывающих потоки данных между теми вершинами графа, которые они соединяют. Таким образом, первым этапом моделирования является построение ориентированного графа прохождения потока заявок через множество обслуживающих аппаратов, выполняющих одну из операций портового обслуживания.

Для построения ориентированного графа был выполнен анализ технологического процесса терминальной обработки импортного контейнеропотока, пребывающего на территорию ОАО «ВМТП» с выгрузкой в «холодной» или «горячей» зоне контейнерного терминала (рис. 1). Следует отметить, что при моделировании рассматривается необходимое условие использования промежуточного узла «горячая зона», т. е. таможенное оформление осуществляется еще до прибытия судна и груза в порт (по технологии предварительного информирования таможенных органов). Это необходимое условие представлено на схеме рис. 1 в виде операций *1 – 4*. До прибытия судна в порт все владельцы груза (заинтересованные лица) подают в электронной форме в таможенный орган прибытия (ТО) предварительную информацию о товаре (ПИТ) и предварительную декларацию на товары (ПТД).



1 — подача владельцем груза ПИТ и ПТД, а судовладельцем (перевозчиком) — предварительного ПДС, проверка ТО информации и принятие предварительных решений;
2 — подача судовладельцем (перевозчиком) окончательного ПДС, а владельцем груза — уточняющих сведений в ПТД /дополнительная проверка ПДС и ПТДТО, формализация ранее принятых решений;
3 — ввоз разрешен (разрешение на разгрузку контейнеров);
4 — проведение государственного контроля на судне;
5 — разгрузка контейнеров / штабелирование контейнеров у причала;
6 — перевозка к месту временного хранения на контейнерном терминале согласно принятым ТО решениям;
7 — штабелирование в «холодной зоне» (решение ТО о проведении документального контроля), регистрация по месту ВХ;
8. — соблюдение декларантом условий выпуска;
9 — выпуск контейнера в соответствии с заявленной таможенной процедурой (условный выпуск)
10 — штабелирование в «горячей» зоне (решение ТО о проведении таможенного осмотра / досмотра), регистрация по месту ВХ;
11 — формирование ТО требования контейнерному терминалу о выставлении контейнера (ов) на осмотр / досмотр;
12 — доставка нужного контейнера из штабеля (если осуществляется осмотр / досмотр одного контейнера);
13 — доставка нескольких контейнеров (если осуществляется осмотр / досмотр партии контейнеров);
14 — проведение таможенного осмотра / досмотра;
15 — правонарушения не выявлены;
16 — правонарушения выявлены / перевозка контейнера в специальную зону (по АПН);
17 — решение вопроса об АПН;
18 — вывоз контейнеров из порта

Рис. 1. Схема терминальной обработки импортного контейнеропотока в морском порту с выгрузкой в «холодной» и «горячей» зоне

Перевозчик (судоходная компания или судовой агент) также подает предварительные документы и сведения (ПДС) о судне и грузе за 24 ч до прибытия в форме предварительного ПДС. По прибытию судна перевозчик подает окончательную форму ПДС, а владелец груза (при необходимости) вносит уточняющие сведения в поданную ранее предварительную декларацию. Таким образом, еще до прибытия судна в порт, в информационной системе таможенных органов осуществляется проверка прибывающих контейнерных партий груза по СУР и формируются предварительные решения по каждой товарной партии в части проведения (назначения) форм таможенного контроля.

По прибытию судна в порт ранее принятые решения формализуются. До выгрузки контейнеров в администрацию порта и контейнерный терминал поступает информация о контейнерных партиях товаров, разрешенных к ввозу, разгрузке, а также по которым назначен таможенный осмотр (досмотр).

Операции *5 – 18* — основные операции, для которых необходимо определение временных параметров. Осуществляется выгрузка контейнеров, штабелирование у причала. Перевозка контейнеров к месту временного хранения на контейнерном терминале с учетом зонирования (на основании информации, представленной на контейнерный терминал ТО). При этом в «холодную» зону помещаются контейнеры, по которым сразу принято решение о выпуске или назначен только документальный контроль. При соблюдении декларантом условий выпуска (предоставлены все необходимые документы, оплачены налоги и пошлины), контейнер выпускается в соответствии с заявленной таможенной процедурой и может быть вывезен с территории порта.

Штабелирование в «горячей» зоне осуществляется с учетом принадлежности контейнера к товарной партии и графика проведения таможенного осмотра (досмотра). В соответствии с требованием ТО на проведение таможенного контроля осуществляется доставка нужного контейнера (или контейнеров) из штабеля в соответствующую зону осмотра (досмотра). Проводится таможенный осмотр (досмотр), по результатам которого либо осуществляется выпуск контейнера (правонарушения не выявлены, соблюдены условия выпуска), либо контейнер перевозится в специальную зону до решения вопроса об административном правонарушении (АПН). При решении вопроса об АПН (закрытие дела об АПН, внесение обеспечения уплаты таможенных платежей и т. д.) осуществляется выпуск (или условный выпуск) контейнера и он также может быть вывезен с территории порта.

Для построения системы массового обслуживания представленной технологии были определены (заданы) ее параметры:

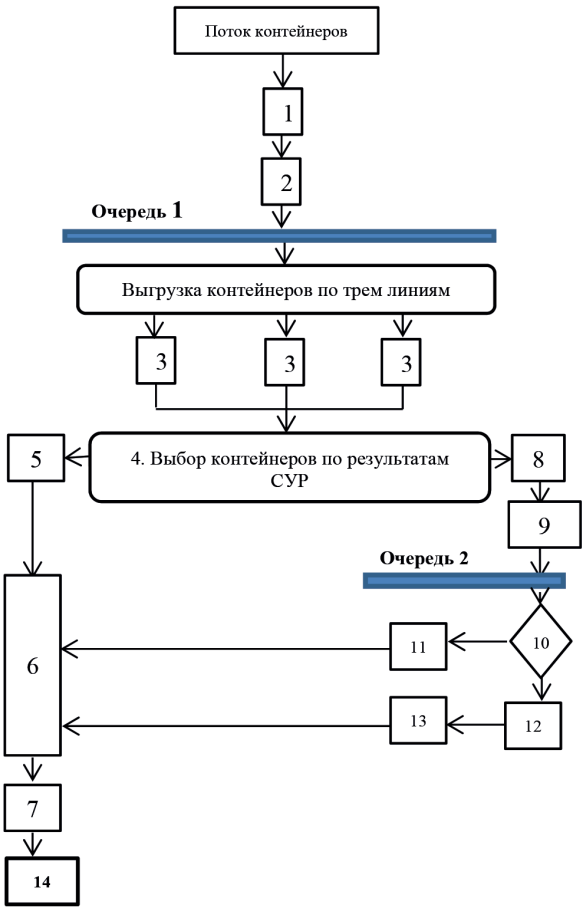
– *поток заявок*, поступающих для обработки, и их характер — в данном случае поток контейнеров и поток документов и сведений на контейнерные партии, необходимый для прохождения таможенных формальностей (ПИТ, ПДС и иные сопроводительные документы);

– *множество обслуживающих аппаратов* — некоторый условный аппарат, выполняющий одну из операций портового обслуживания контейнеров;

– *дисциплина обслуживания* — условия, последовательность и порядок выполнения операций, длительность и приоритетность, количество одновременно обслуживаемых заявок.

Операции терминальной обработки контейнеров, не требующие существенных временных затрат или те, которые необходимо рассматривать совместно с другими операциями, были опущены.

На основании схемы терминальной обработки импортного контейнеропотока с последующим распределением в «холодную» или «горячую» зону контейнерного терминала был выполнен переход к ориентированному графу, представленному на рис. 2.



1 — прибытие судна в порт / подача судовладельцем (перевозчиком) окончательного ПДС, декларантом уточняющих сведений в ПТД / дополнительная проверка ТО окончательного ПДС и ПТД, формализация ранее принятых решений /проведение Государственного контроля на судне;
2 — ввоз разрешен / разрешение на разгрузку контейнеров;
3 — **очередь 1** — выгрузка контейнеров по трем технологическим линиям / штабелирование у причала;
4 — выбор контейнеров по результатам СУР: перевозка контейнеров в зоны хранения согласно принятым решениям
5 — штабелирование контейнеров в «холодной» зоне;
6 — соблюдение декларантом условий выпуска;
7 — выпуск контейнера(ров) разрешен;
8 — штабелирование контейнеров в «горячей» зоне / назначение таможенного осмотра (досмотра) / выставление ТО требования администрации порта на подачу контейнеров
9 — выставление нужного контейнера (контейнеров) из штабеля на площадку осмотра (досмотра);
10 — **очередь 2**_— проведение таможенного осмотра / досмотра;
11 — АПН не выявлены;
12. — АПН выявлены;
13 — перемещение контейнера в спец. зону / решение декларанта с ТО вопроса об АПН;
14 — вывоз контейнеров из порта

Рис. 2. Ориентированный граф модели массового обслуживания импортного контейнерного потока в порту

Первую очередь формирует поток контейнеров, прибывших на судне и требующих выгрузки на контейнерный терминал ОАО «ВМТП». Одновременно могут обрабатываться три контейнера, что обусловлено особенностями Владивостокского морского порта, имеющего три технологические линии для обработки судна. Остальные контейнеры ожидают своей очереди.

Вторую очередь формируют контейнеры, находящиеся в «горячей» зоне и ожидающие своей очереди для проведения контрольных операций таможенного осмотра (досмотра). Следует отметить, что объем этих контейнеров составляет около 20 % от объема контейнеров, переработанных в первой очереди согласно принципу Парето. Остальные 80 % попадают в накопительную зону хранения («холодную») до момента их выпуска таможенным органом и вывоза с территории порта. По данным Дальневосточного таможенного управления, при условии подачи участником внешнеэкономической деятельности предварительной декларации на товары осуществить выпуск контейнера, расположенного в «холодной» зоне, возможно, в течение от 20 мин до 2 ч с момента получения от декларанта уведомления о прибытии товарной партии.

Обсуждение (Discussion)

Условно технологией зонирования можно считать идею создания современных контейнерных терминалов в виде «сухих портов», расположение которых предварительно определено, в том числе, в районе Находкинского и Владивостокского транспортных узлов. Под определением «сухой порт» понимается совокупность склада временного хранения (СВХ), иных зданий, строений, сооружений, автомобильных и / или железнодорожных путей и иных объектов, расположенных за пределами территории морского порта, связанных между собой и с морским портом единым технологическим процессом, предназначенных для совершения грузовых операций с товарами и для их временного хранения под таможенным контролем, оснащенных электронной информационной системой [21, с. 49]. Исходя из этого определения, можно сделать вывод о том, что «сухой порт» является аналогом «горячей» зоны контейнерного терминала, лежащей в основе анализируемых в предлагаемой работе исследований, только в удаленном от порта варианте.

В работе [22] на основе имитационного моделирования транспортных операций в системах, предполагающих использование промежуточного транспортного узла — «сухого» порта —выполнено сравнение затрат и эксплуатационных преимуществ в сравнении с традиционной схемой доставки только через морские порты. В ней, в частности, отмечается следующее: «*Введение в транспортно-логистическую сеть дополнительного звена в виде «сухого порта имеет свои преимущества и недостатки. К преимуществам относится значительное снижение требований к площадям, расположенным в границах порта, что в ряде случаев может оказаться определяющим для принятия решения, оптимизирующего системные затраты по всей цепи <...>. К недостаткам <...> следует отнести появление дополнительной транспортировки и, в общем случае, дополнительной перевалки. При выходе на пути общего пользования соответствующие затраты могут оказаться сравнимыми с основной перевозкой от грузоотправителя до морского порта, что будет полностью исключать возможность использования всей концепции...*» [22, с. 80].

Следовательно, с нашей точки зрения, использование инфраструктуры «сухого порта» в деятельности терминалов ОАО «ВМТП» не даст ожидаемого эффекта в решении вопросов, связанных с минимизацией времени нахождения контейнеров в морских портах, из-за географического расположения Владивостокского порта (в центре города Владивостока, в его исторической части). Указанное расположение существенно лимитирует объем контейнерного потока, следующего из порта в единицу времени, а перевалка контейнеров в зону «сухого порта» сразу после разгрузки судна увеличит интенсивность этого потока, что, в свою очередь, приведет к ухудшению и без того сложной ситуации в припортовом транспортном узле. Альтернативой «сухого порта» именно для ОАО «ВМТП» является способ организации более эффективного использования уже имеющихся площадей контейнерного терминала, в частности использование «горячей» и «холодной» зон хранения для контейнеров, находящихся под таможенным контролем. Однако прежде чем приступать к проведению натурного эксперимента непосредственно на контейнерном терминале,

необходимо убедиться в эффективности предложенной технологии в процессе математического моделирования. Для этого были разработаны математические модели [11], [18]. Одна из блок-схем предложенной модели массового обслуживания импортного контейнерного потока в порту выносится на обсуждение в данной статье.

Заключение (Conclusion)

Таким образом, представленный в статье ориентированный граф является основой для построения имитационной модели процесса терминальной обработки импортного контейнеропотока в морском порту с применением логистической технологии зонирования контейнерного терминала, которая позволит оценить предельные возможности технологии еще до ее внедрения в деятельность ОАО «ВМТП». Наделив элементы графа необходимыми свойствами и специфицировав на формальном языке процедуры их возможного взаимодействия в специализированной программной среде (например, Simulink), можно перейти непосредственно к самой имитационной модели. В данном случае модель будет представлять собой дискретно-событийное имитационное моделирование, отличающееся динамической изменчивостью поступления контейнеров в систему (в момент прибытия судна, его разгрузки, подачи декларации на товары, документов и сведений по судну, проведения таможенного осмотра (досмотра)).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Федеральный закон от 13.07.2015 N 212-ФЗ (ред. от 03.07.2016). О свободном порте Владивосток [Электронный ресурс]. — Режим доступа: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_182596/ (дата обращения: 10.02.17).

2. *Янченко А. А.* Предварительное информирование таможенных органов — новое направление организации контейнерных перевозок в условиях функционирования свободного порта Владивосток (на примере компании ООО «ФИТ») / А. А. Янченко, А. Ж. Радочинская, А. В. Костин, А. В. Жихарева // Молодежь, наука, инновации: материалы 64-й Междунар. молодежной науч.-техн. конф. — 2016. — Т. 1. — С. 597–600.

3. *Янченко А. А.* Алгоритм оформления судна в порту по технологии предварительного информирования таможенных органов в условиях свободного порта Владивосток / А. А. Янченко, Т. Е. Маликова, А. В. Кузьмин // Территории опережающего социально-экономического развития в Российской Федерации и свободный порт Владивосток: сб. науч. тр. X Региональной науч. конф., посвященной 25-летию ФТС России. — Владивосток: Владивостокский филиал Российской таможенной академии, 2016. — С. 257–262.

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

5. *Ануфриев О. Б.* Использование предварительного информирования при перевозках товаров морским транспортом / О.Б. Ануфриев, В. А. Колбешин, Ю. В. Малышенко, А. А. Полошевец // Вестник Российской таможенной академии. — 2012. — № 4. — С. 038–047.

6. *Азовцев А. И.* Разработка инфологической модели базы данных предварительного информирования таможенных органов для судоходной компании / А. И. Азовцев, Т. Е. Маликова, А. И. Филиппова, А. А. Янченко // Морские интеллектуальные технологии. — 2016. — Т. 1. — № 3 (33). — С. 327–332.

7. *Маликова Т. Е.* Применение технологии предварительного информирования таможенных органов при морских внеплановых грузоперевозках / Т. Е. Маликова, А. А. Янченко // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2016. — № 3 (37). — С. 33–45. DOI: 10.21821/2309-5180-2016-7-3-33-45.

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

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

10. *Маликова Т. Е.* Организация таможенного контроля на контейнерных терминалах в морских пунктах пропуска / Т. Е. Маликова // Проблемы транспорта Дальнего Востока. Доклады десятой юбилейной международной науч.-практ. конф. 2–4 октября 2013 г. — Владивосток: ДВО РАТ, 2013. — С. 81–83.

11. *Маликова Т. Е.* Анализ процесса формирования таможенного логистического потока на контейнерном терминале / Т. Е. Маликова, Ю. В. Гришина // Проблемы транспорта Дальнего Востока. Доклады десятой юбилейной междунар. науч.-практ. конф. 2–4 октября 2013 г. — Владивосток: ДВО РАТ, 2013. — С 217–218.

12. *Маликова Т. Е.* Разработка системы слежения за импортными грузопотоками, оформляемыми по технологии предварительного информирования в морском пункте пропуска / Т. Е. Маликова, А. И. Филиппова // Морские интеллектуальные технологии. — 2016. — Т. 2. — № 4 (34). — С. 32–36.

13. *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.

14. *Майоров Н. Н.* Исследование состояния контейнерного терминала на основе транспортной модели и имитационного моделирования / Н. Н. Майоров, А. В. Кириченко, В. А. Фетисов // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2016. — № 3 (37). — С. 7–15. DOI: 10.21821/2309-5180-2016-7-3-7-15.

15. Король Р. Г. Технологические аспекты функционирования «сухих портов» / Р. Г. Король, А. С. Балалаев // Вестник Тихоокеанского государственного университета. — 2014. — № 3 (34). — С. 123–126.

16. *Король Р. Г.* Имитационное моделирование системы «железнодорожная станция – морской порт» на примере Владивостокского транспортного узла / Р. Г. Король, А. С. Балалаев // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2015. — № 3 (31). — С. 209–216.

17. *Король Р. Г.* Имитационное моделирование работы припортовой железнодорожной станции с вероятностно-статистическим подходом к изменению параметров поступающего вагонопотока / Р. Г. Король, А. С. Балалаев // Транспорт Урала. — 2014. — № 3 (42). — С. 53–57.

18. *Маликова Т. Е.* Модель массового обслуживания импортного грузопотока с применением технологии предварительного информирования / Т. Е. Маликова, А. А. Янченко, И. Н. Вольнов // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2017. — Т. 9. — № 2. — С. 280–287. DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-2-280-287.

19. *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.

20. *Кузнецов А. Л.* Роль имитационного моделирования в технологическом проектировании и оценке параметров грузовых терминалов / А. Л. Кузнецов, А. В. Кириченко, В. А. Погодин, В. Н. Щербакова-Слюсаренко // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Морская техника и технология. — 2017. — № 2. — С. 93–102. DOI: 10.24143/2073-1574-2017-8-2-93-102.

21. *Балалаев А. С.* Преимущества комплексного подхода в сфере контейнерных перевозок (на примере Транссибирской магистрали) / А. С. Балалаев // Таможенная политика России на Дальнем Востоке. — 2011. — № 1 (54). — С. 47–55.

22. *Кузнецов А. Л.* Обоснование концепции «сухого» порта / А. Л. Кузнецов, В. Н. Щербакова-Слюсаренко // Транспортное дело России. — 2013. — № 4. — С. 77–80.

REFERENCES

1. Russian Federation. Federal Law N 212-FZ from 13 July 2015. Web. 10 Feb. 2017 < http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_182596/>.

2. Yanchenko, A. A., A. Zh. Radochinskaya, A. V. Kostin, and A. V. Zhikhareva. “Predvaritel’noe informirovanie tamozhennykh organov - novoe napravlenie organizatsii konteinernykh perevozok v usloviyakh funktsionirovaniya svobodnogo porta Vladivostok (na primere kompanii OOO «FIT»).” *Molodezh’, nauka,*

innovatsii: Materialy 64-i Mezhdunarodnoi molodezhnoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii. Vol. 1. 2016. 597–600.

3. Yanchenko, A. A., T. E. Malikova, and A. V. Kuzmin. "The Algorithm for Ship Clearance at Port According to the Technology of Preliminary Informing Customs Authorities under the Conditions of the Free Port of Vladivostok." *Territorii operezhayushchego sotsial'no-ekonomicheskogo razvitiya v Rossiiskoi Federatsii i svobodnyi port Vladivostok sbornik nauchnykh trudov X Regional'noi nauchnoi konferentsii, posvyashchennoi 25-letiyu FTS Rossii*. Vladivostok: Vladivostokskii filial Rossiiskoi tamozhennoi akademii, 2016: 257–262.

4. Antonova, E. I., T. I. Belousova, and E. V. Dikarev. "Challenges and prospects for implementation of preliminary informing technology by sea transportation." *Sovershenstvovaniye sistemy informatsionno-tekhnicheskogo vzaimodestviya tamozhennyh organov s vneshnimi sistemami: sbornik materialov mezhvuzovskoy molodezhnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii kafedry informatiki i informatsionnyh tamozhennyh tehnologii*. Ed. I. I. Nikitchenko. M.: Rossiyskaya tamozhennaya akademiya, 2014: 25–29.

5. Anufriev, Oleg Borisovich, Vitaliy Anatolievich Kolbeshin, Uriy Veniaminovich Malishenko, Aleksandr Aleksandrovich Poloshevits. "Usage of preliminary information provided on sea shipments." *Vestnik Rossiiskoi tamozhennoi akademii* 4 (2012): 038–047.

6. Azovtsev, A. I., T. E. Malikova, A. I. Filippova, and A. A. Yanchenko. "The development of infological customs preliminary informing data base model for shipping company." *Marine Intellectual Technologies* 1.3(33) (2016): 327–332.

7. Malikova, Tatiana Egorovna, and Anna Anatol'evna Yanchenko. "The implementation of preliminary informing technology of customs authorities in sea spot cargo transportation." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova* 3(37) (2016): 33–45. DOI: 10.21821/2309-5180-2016-7-3-33-45.

8. Yanchenko, A. A., and A. Z. Radochinskaya. "K voprosu vnedrenija tehnologii predvaritel'nogo informirovanija v linejnom sudohodstve." *Transport Aziatsko-Tihokeanskogo regiona* 4 (2015): 19–23.

9. Malikova, T. E., and A. A. Yanchenko. "The system analysis of transport market participants interaction in the process of goods clearance at sea port." *Nauchnye problem transporta Sibiri i Dalnego Vostoka* 4 (2015): 25–29.

10. Malikova, T. E. "Organizatsiya tamozhennogo kontrolya na konteinernykh terminalakh v morskikh punktakh propuska." *Problemy transporta Dal'nego Vostoka. Doklady desyatoi yubileinoi mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii. 2-4 oktyabrya 2013 g.* Vladivostok: DVO RAT, 2013. 81–83.

11. Malikova, T. E., and Yu. V. Grishina. "Analiz protsessa formirovaniya tamozhennogo logisticheskogo potoka na konteinernom terminale." *Problemy transporta Dal'nego Vostoka. Doklady desyatoi yubileinoi mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii. 2-4 oktyabrya 2013 g.* Vladivostok: DVO RAT, 2013. 217–218.

12. Malikova, T. E., and A. I. Filippova. "Development of tracking flow of import goods, cleared through advance notification technology at a sea border entry point." *Marine Intellectual Technologies* 2.4(34) (2016): 32–36.

13. 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.

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

15. Korol, R. G., and A. S. Balalaev. "Technological Aspects of "Dry Ports" Functioning." *Vestnik tikhookeanskogo gosudarstvennogo universiteta* 3(34) (2014): 123–126.

16. Korol, R. G., and A. S. Balalaev. "The simulation modeling system «railway station – seaport» Vladivostok transport hub." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova* 3(31) (2015): 209–216.

17. Korol, R. G., and A. S. Balalaev. "Simulation of port railway station operation using probabilistic and statistical approach to change in incoming traffic parameters." *Transport Urala* 3(42) (2014): 53–57.

18. Malikova, Tatiana E., Anna A. Yanchenko, and Igor N. Volnov. "The model of massive handling cargo flow for import with the use of preliminary informing technology." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova* 9.2 (2017): 280–287. DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-2-280-287.

19. 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.

20. Kuznetsov, Alexander L'vovich, Alexander Viktorovich Kirichenko, Vladimir Alekseyevich Pogodin, Victoria Nikolaevna Shcherbakova-Slyusarenko. "Importance of simulation modelling for technological design and evaluating parameters of cargo terminals." *Vestnik of Astrakhan State Technical University. Series: Marine Engineering and Technologies* 2 (2017): 93–102. DOI: 10.24143/2073-1574-2017-2-93-102.

21. Balalaev, A. S. "Preimushchestva kompleksnogo podkhoda v sfere konteinernykh perevozok (na primere Transsibirskoi magistrali)." T*amozhennaya politika Rossii na Dal'nem Vostoke* 1(54) (2011): 47–55.

22. Kuznetsov, A. L., and V. N. Sherbakova-Slysarenko. "Justification of "DRY PORT" concept." *Transport business in Russia* 4 (2013): 77–80.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Янченко Анна Анатольевна —
старший преподаватель
Владивостокский филиал Российской таможенной академии
690034, Российская Федерация, Владивосток, ул. Стрелковая, 16В
e-mail: *annanyan@yandex.ru*

Маликова Татьяна Егоровна — доктор технических наук, доцент
Морской государственный университет имени адмирала Г. И. Невельского
690003, Российская Федерация, Владивосток, ул. Верхнепортовая, д. 50а
e-mail: *TanMalik@mail.ru*

Вольнов Игорь Николаевич —
кандидат физ.-мат. наук, доцент
Владивостокский филиал Российской таможенной академии
6900034, Российская Федерация, Владивосток, ул. Стрелковая, 16В
e-mail: *ig_volnov@mail.ru*

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Yanchenko, Anna A. —
Senior lecturer
Vladivostok Branch of the Russian Customs Academy
16 V Strelkovaya Str., Vladivostok, 690034, Russian Federation
e-mail: *annanyan@yandex.ru*

Malikova, Tatiana E. —
Dr. of Technical Sciences, associate professor
Maritime State University named after Admiral G.I. Nevelskoi
50a Verkhneportovaya Str., Vladivostok, 690003, Russian Federation
e-mail: *TanMalik@mail.ru*

Volnov, Igor N. —
PhD, associate professor
Vladivostok Branch of the Russian Customs Academy
16 V Strelkovaya Str., Vladivostok, 690034, Russian Federation
e-mail: *ig_volnov@mail.ru*

Статья поступила в редакцию 17 июня 2017 г.
Received: June 17, 2017.

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

DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-4-714-723

RESEARCH OF THE MAIN PARAMETERS OF THE GENETIC ALGORITHM FOR THE PROBLEM OF SEARCHING THE OPTIMAL ROUTE

K. F. Fedorenko, A. L. Olovyannikov

Maritime State University named after Admiral G. I. Nevelskoi,
Vladivostok, Russian Federation

The article is aimed for developing and improving the accuracy of the automated systems of control of marine vessels applying the genetic algorithm. Any system of automated control begins from the solution of the primary task of the navigator during his normal activity - the search for the optimal route. This task is global, contains many solutions and does not require absolute accuracy. To solve this problem, the genetic algorithm, which is a heuristic algorithm of global search, is best suited. This algorithm operates with various genetic operators, such as crossing, mutation, selection, generation of populations and generations. These operators can be adapted to the needs of navigation — finding the best route. Thus, the genotype, as a value operated by the algorithm, can be represented in the form of a route consisting of separate waypoints (genes). Further, through the application of genetic operators, routes are created and transformed until an optimal route is found, avoiding all sorts of navigational hazards. However, the mechanism of search severely depends on the coefficients that determine the mode of operation of the genetic operators. The effectiveness of this method of solving the navigation problem directly depends on the selected coefficients that make the solution of the problem fast and reliable, or completely deprive the algorithm of efficiency. So that, before the direct application of the algorithm in navigational conditions, it is necessary to identify the main regularities between the coefficients used, and also to determine the optimal values at which the algorithm's work will be most effective.

Keywords: genetic algorithm, search of the optimal route, population size, crossing over factor, mutation factor.

For citation:
Fedorenko, Kirill V., and Arkadii L. Olovyannikov. "Research of the main parameters of the genetic algorithm for the problem of searching the optimal route." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova* 9.4 (2017): 714–723. DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-4-714-723.

УДК 004+656.61.052

ИССЛЕДОВАНИЕ ОСНОВНЫХ ПАРАМЕТРОВ ГЕНЕТИЧЕСКОГО АЛГОРИТМА ПРИМЕНИТЕЛЬНО К ЗАДАЧЕ ПОИСКА ОПТИМАЛЬНОГО МАРШРУТА

К. В. Федоренко, А. Л. Оловянников

Морской государственный университет имени адмирала Г. И. Невельского,
Владивосток, Российская Федерация

Статья посвящена развитию и улучшению точности работы систем автоматизированного управления морскими судами, использующих генетический алгоритм. Любая система автоматизированного управления начинается с решения задачи, с которой повсеместно сталкивается судоводитель в ходе своей деятельности — поиску оптимального маршрута. Данная задача является глобальной, содержит множество решений и не требует абсолютной точности. Для решения подобной задачи наилучшим образом подходит генетический алгоритм, представляющий собой эвристический алгоритм глобального поиска. Данный алгоритм оперирует различными генетическими операторами, такими как скрещивание, мутация, селекция, генерация популяций и поколений. Данные операторы могут быть адаптированы под нужды судовождения — поиска оптимального маршрута. Таким образом, генотип как оперируемая алгоритмом величина может быть представлен в виде маршрута, состоящего из отстоящих друг от друга путевых точек. Далее посредством применения генетических операторов маршруты создаются и преобразуются до тех пор, пока не будет найден оптимальный маршрут, избегающий всякого рода навигационные опасности. Однако сам механизм поиска сильно зависит от коэффициентов, которые задают режим работы генетических операторов. Эффективность данного способа решения навигационной задачи напрямую зависит от выбранных коэффициентов, делающих решение задачи быстрым и надежным либо полностью лишающих алгоритм

работоспособности. Т. е. перед непосредственным применением алгоритма в условиях судовождения необходимо выявить основные закономерности между используемыми коэффициентами, а также определить оптимальные значения, при которых работа алгоритма будет наиболее эффективной.

Ключевые слова: генетический алгоритм, поиск оптимального пути, размер популяции, коэффициент скрещивания, коэффициент мутации.

Для цитирования:
Федоренко К. В. Исследование основных параметров генетического алгоритма применительно к задаче поиска оптимального маршрута / К. В. Федоренко, А. Л. Оловянников // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2017. — Т. 9. — № 4. — С. 714–723. DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-4-714-723.

Введение

В настоящее время опыт использования машинного обучения нередко находит свое применение в системах автоматизированного управления судном. Учитывая, что основной причиной кораблекрушений, будь то столкновение или посадка на мель, как 20 лет назад, так и по сегодняшний день является человеческий фактор [1]. Автоматизированные системы по своей сути призваны снизить количество ошибок, допускаемых человеком, осуществляющим навигацию, путем оценки, прогнозирования и оказания помощи в принятии решений на всех этапах навигации [2]. Одним из способов реализации подобной автоматизированной системы является генетический алгоритм (ГА), представляющий собой комплексный алгоритм оптимизации, основанный на эволюционных механизмах в природе [3], [4]. Метод адаптации данного алгоритма применительно к навигационным задачам, а также описание его ключевых особенностей и терминологии представлены в статье [5]. Эффективность работы данного алгоритма напрямую зависит от оперируемых генетических параметров (генетических операторов), что делает невозможной оценку релевантности данного метода в отрыве от исследования эффективного воздействия генетических операторов на его работу. Так как ГА отождествляется с эволюционным процессом в природе [3], изменение одного или нескольких его операторов неминуемо сказывается на эволюции, протекающей в цикле алгоритма. Задача алгоритма в данном исследовании заключается в поиске оптимального маршрута на плоскости. Таким образом, степень влияния генетических операторов на его работу определяется показателями эффективности, такими как длина маршрута, затраченное время, количество поколений и задействованные ресурсы.

Нередко генетический алгоритм находит свое применение в различных автоматизированных системах, направленных на оптимизацию морских грузопотоков [6] и размещение шлюзов в сети навигационных знаков [7], в различных Vehicle Routing System (VRS), активно внедряемых в логистических компаниях для оптимизации автоперевозок с учетом загруженности дорог и рационализации маршрутов морской транспортировки [8], а также в системе поиска оптимального маршрута [5], на основе которой производилось данное исследование. Однако, несмотря на многочисленные преимущества генетического алгоритма, его работу едва ли можно назвать стабильной, учитывая влияние случайного фактора как при генерации начальной популяции, так и при применении операторов скрещивания и мутации [5]. Так, например, в статье [8] выявлено, что оператор мутации в составе ГА может оказывать отрицательное влияние на эффективность выбранного способа решения задачи. Тем не менее, сделать работу алгоритма более стабильной и надежной, а также повысить его эффективность применительно к поставленной задаче возможно и необходимо перед внедрением систем подобного рода. В статье [5] автор подчеркивает, что работоспособность алгоритма и его эффективность напрямую зависят от его первоначальной настройки. Под настройкой следует понимать правильный выбор коэффициентов для генетических операторов в составе алгоритма, таких как коэффициент скрещивания и мутации. Упущением в статье [8] является то, что оператор мутации может быть не только включен или выключен в эволюционном процессе, но также может быть ограничен вероятностью по соответствующему коэффициенту, что при должном исследовании избавит от необходимости включения или чередования данного оператора; тот же принцип касается и оператора скрещивания в настоящей статье. Таким образом, данное исследование направлено

на выявление основных тенденций поведения алгоритма в зависимости от изменения коэффициентов скрещивания и мутации, определения оптимальных интервалов и наилучших комбинаций, способных обеспечить максимально эффективную работу алгоритма в исследуемой задаче [5].

Цель данной работы: наглядно продемонстрировать влияние различных коэффициентов на работу алгоритма; выявить основные тенденции поведения в зависимости от различных генетических операторов и определить степень их влияния; установить оптимальные интервалы и комбинации, которые смогут гарантировать эффективную работу алгоритма в условиях поставленной задачи.

Методы и материалы

Исследование производилось на программном обеспечении собственного производства на языке программирования C++ с интегрированным кроссплатформенным инструментарием в виде QT-библиотек «Genetic Algorithm», содержащих налаженный и открытый для настройки генетический алгоритм в исходном виде. В среде Microsoft Visual Studio 2010 данный алгоритм адаптирован к условиям поставленной графической задачи — поиску оптимального маршрута на плоскости. Данная модель не является самостоятельным ПО и не годится для интеграции в навигационные системы, а представляет собой демонстрационную математическую модель для исследования поведения ГА в условиях поставленной графической задачи. Исходный код программы не находится в открытом доступе, однако ключевые особенности ее работы рассмотрены в настоящей статье. Данная программа руководствуется фундаментальными понятиями о ГА и реализации генетических операторов [3], [9] – [11], за основу работы взята модель, представленная в статье [5].

Вычисления производятся центральным процессором Intel Core i7-4710HQ в одноядерном режиме. Важно понимать, что показатели эффективности, а также настройки базовых параметров алгоритма, таких как размер популяции и ограничение по количеству поколений, могут отличаться в зависимости от используемой конфигурации системы, однако не оказывают существенного влияния на исследуемые коэффициенты.

Популяция представляет собой неупорядоченное множество {P} [12], включающее в себя все генотипы (маршруты), которые принимают участие во всех циклах алгоритма, таких как скрещивание, мутация и отбор. *P* представляет собой предельное значение данного множества, ограничивая тем самым количество генотипов, принимаемых к вычислению. Результаты на примере решения простой задачи (поиска маршрута, не осложненного значительными препятствиями) представлены далее. Разумным выводом на основе графика зависимости количества поколений от размера популяции (рис. 1) было бы то, что с увеличением размера популяции растет и эффективность работы алгоритма путем снижения количества поколений, необходимых для решения задачи, однако учитывая временную составляющую данного испытания, содержащуюся в табл. 1, можно утверждать, что, несмотря на снижение количества поколений, время, необходимое для расчета каждого из них, значительно возрастает в связи с увеличением нагрузки на вычислительную систему путем увеличения размера популяции в каждом цикле. Таким образом, наилучшим размером популяции для данной вычислительной системы является размер из 1000 особей за цикл, который и будет использован во всех последующих испытаниях.

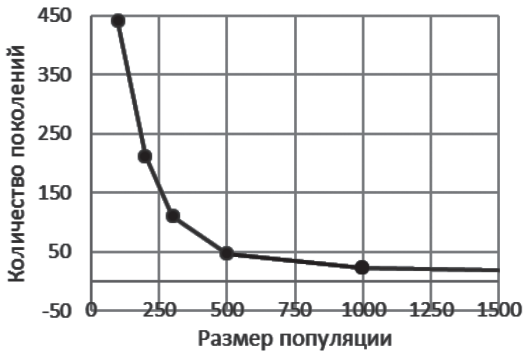


Рис. 1. Зависимость количества поколений от размера популяции

Таблица 1

Зависимость количества поколений от размера популяции

Размер популяции	Количество поколений	Затраченное время, с
100	441	4,85
200	213	4,26
300	111	3,44
500	47	2,35
1000	23	2,28
2000	15	3,15
5000	14	6,58
10000	10	8,91

В данном исследовании применяется однородный одноточечный кроссинговер [13], смысл которого заключается в разрыве генотипа в случайной точке с последующей рекомбинацией получившихся двух частей генотипов. Графически в условиях поставленной задачи скрещивание выглядит следующим образом (рис. 2).

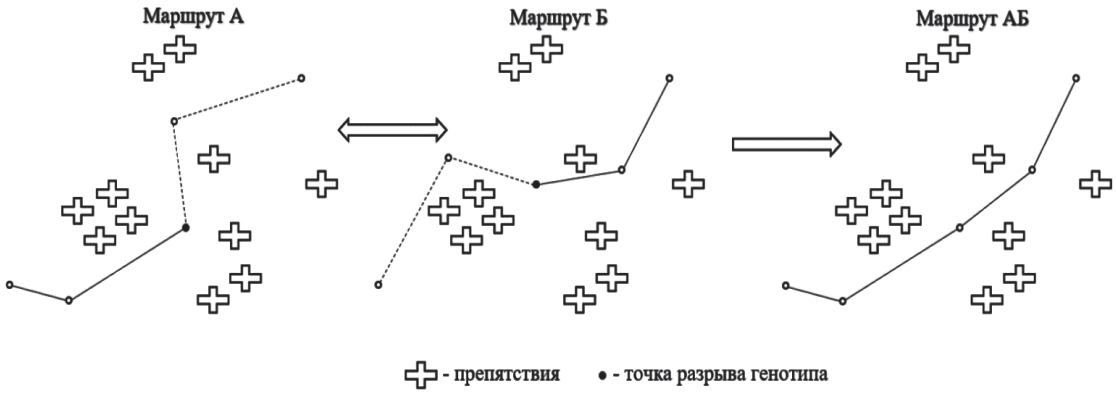


Рис. 2. Графическая демонстрация оператора скрещивания

Коэффициент скрещивания K_c представляет собой частоту рекомбинации генов и определяется по формуле

$$K_c = \frac{P_c}{P} \cdot 100,$$

где P_c — общее количество рекомбинантов в популяции.

Мутация случайная, но с заданной вероятностью. Коэффициент мутации K_m задает вероятность, с которой гены в составе генотипа будут изменяться случайным образом. На рис. 3 представлена программная реализация оператора мутации.

```
        int randomTemp2 = rand() % 100;

        if (randomTemp2 <= m_mutationPropobility)
        {
            newChild.gens[i].length = (float)(rand() % LENGHT_RANDOM_RANGE) / 10;
            newChild.gens[i].corner = (float)(rand() % 6291) / 1000;
        }
    }
    return newChild;
```

Рис. 3. Реализация оператора мутации

Результаты, полученные в ходе исследования, выражены в количестве поколений, затраченных на поиск оптимального маршрута. Длины маршрутов выражены в условных единицах в масштабе рабочей области программы. Оптимальным маршрутом в условиях исследования считается результат с отклонением не более 7,5 % от наикратчайшего маршрута. Кратчайшим маршрутом является абсолютное решение поставленной графической задачи, однако, так как работа данного алгоритма направлена на поиск оптимальных и субоптимальных решений, результаты, соответствующие выбранному критерию отклонения, будут считаться удовлетворительными в рамках данного исследования. Размер популяции составляет 1000 особей за цикл, как указано ранее. Эффективным показателем работы алгоритма является количество поколений от 1 до 1000, затраченное на поиск оптимального решения; при невозможности в отдельно взятом испытании выполнить данные условия количество поколений принято за 1000. Также в рамках испытаний поиск маршрута осложняется разного рода препятствиями, наносимыми графически на рабочую область программы. Каждая пара коэффициентов используется не менее пяти раз, затем берется осредненное значение с целью снижения случайного фактора и погрешностей, полный протокол испытаний содержит 660 результатов.

Результаты

Осредненные результаты 660 испытаний при различных конфигурациях алгоритма приведены в табл. 2. Представлены осредненные значение для каждых пяти испытаний соответствующей конфигурации из пары изменяемых коэффициентов (K_c и K_m). На основании данных табл. 2 распределения поколений можно выявить тенденции поведения генетического алгоритма в зависимости от коэффициентов скрещивания K_c (рис. 4, *а*) и мутации K_m (рис. 4, *б*). На рис. 5 изображена тенденция осредненных по коэффициенту мутации результатов испытаний при изменении коэффициента скрещивания. Исходя из графика, можно заключить следующее:

– с ростом K_c возрастает эффективность работы алгоритма;

– в интервале от 1 до 10 % по коэффициенту скрещивания достигается наибольшая скорость изменения функции — 56,2 поколения за единицу коэффициента скрещивания, что указывает на высокую степень влияния, которое оказывает данный коэффициент на работу алгоритма;

– в интервале от 1 до 30 % алгоритм достигает наихудших параметров эффективности относительно оставшегося участка графика (627,2 поколения против 188,0), что подтверждает неработоспособность алгоритма при низких коэффициентах скрещивания, которые, в свою очередь, значительно затрудняют эволюционный процесс;

– функция достигает минимума при значении K_c = 70 %, что указывает на эффективность работы алгоритма при высоких показателях коэффициента скрещивания;

– в интервале от 70 до 100 % функция начинает возрастать, что указывает на снижение эффективности алгоритма при чрезмерно высоких показателях коэффициента скрещивания;

– в интервале от 70 до 90 % алгоритм достигает наилучших параметров эффективности (138,5 поколения) при случайных коэффициентах мутации.

На графике (см. рис. 4, *б*) продемонстрирована тенденция осредненных по коэффициенту скрещивания результатов испытаний при изменении коэффициента мутации. Исходя из графика, можно заключить следующее:

– с ростом K_m возрастает эффективность работы алгоритма;

– в интервале от 0 до 30 % по коэффициенту мутации достигается наибольшая скорость изменения функции — 14,1 поколения за единицу коэффициента мутации, что значительно уступает скорости изменения функции от коэффициента скрещивания на аналогичном участке графика (24,6 поколений), что свидетельствует о меньшем влиянии коэффициента мутации на работу алгоритма;

– на начальном участке графика функция стремится к уменьшению количества поколений, достигая своего минимума при K_m = 60 %, после чего стремительно возрастает; особенно это заметно на участке от 80 до 90 % (9,7 поколений за единицу коэффициента), что указывает на сни-

жение эффективности работы алгоритма при высоких коэффициентах мутации, которые вносит случайный характер в эволюционный процесс;

– в интервале от 50 до 70 % алгоритм достигает наилучших показателей эффективности (178,5 поколений) при случайных коэффициентах скрещивания.

Таблица 2

Распределение поколений при различных коэффициентах

$K_{c/m}$	*m*0	*m*5	*m*10	*m*20	*m*30	*m*40	*m*50	*m*60	*m*70	*m*80	*m*90	*m*100
***c*1**	1000,0	964,2	1000,0	1000,0	1000,0	988,2	888,8	959,4	1000,0	1000,0	1000,0	1000,0
***c*10**	984,2	465,4	465,2	618,6	151,6	155,6	162,0	243,6	562,8	351,4	811,6	768,0
***c*20**	914,2	619,6	774,0	428,2	41,0	128,0	212,2	136,4	152,2	301,2	647,4	686,0
***c*30**	525,0	463,0	262,0	146,4	377,2	218,6	114,4	71,4	60,4	232,6	142,6	344,4
***c*40**	452,0	653,0	240,4	188,0	142,0	220,6	94,4	135,0	141,8	106,0	273,4	300,4
***c*50**	599,4	527,0	269,6	292,4	104,2	127,6	95,4	59,8	51,8	64,4	176,8	139,6
***c*60**	676,4	547,0	395,2	430,4	40,0	79,8	23,4	63,0	53,2	33,6	50,8	70,8
***c*70**	412,6	445,6	38,6	96,8	59,2	44,6	79,4	19,6	41,0	27,0	57,2	100,0
***c*80**	644,6	101,8	284,8	56,2	177,6	60,8	81,2	29,2	21,8	72,0	67,4	82,0
***c*90**	419,0	256,4	249,0	191,8	113,2	147,8	207,0	19,6	38,4	86,4	90,0	66,2
***c*100**	532,6	414,0	458,6	86,6	313,8	55,0	16,0	33,2	21,6	62,6	90,6	101,6

а)



б)



Рис. 4. Тенденции по коэффициентам скрещивания (*а*) и мутации (*б*)

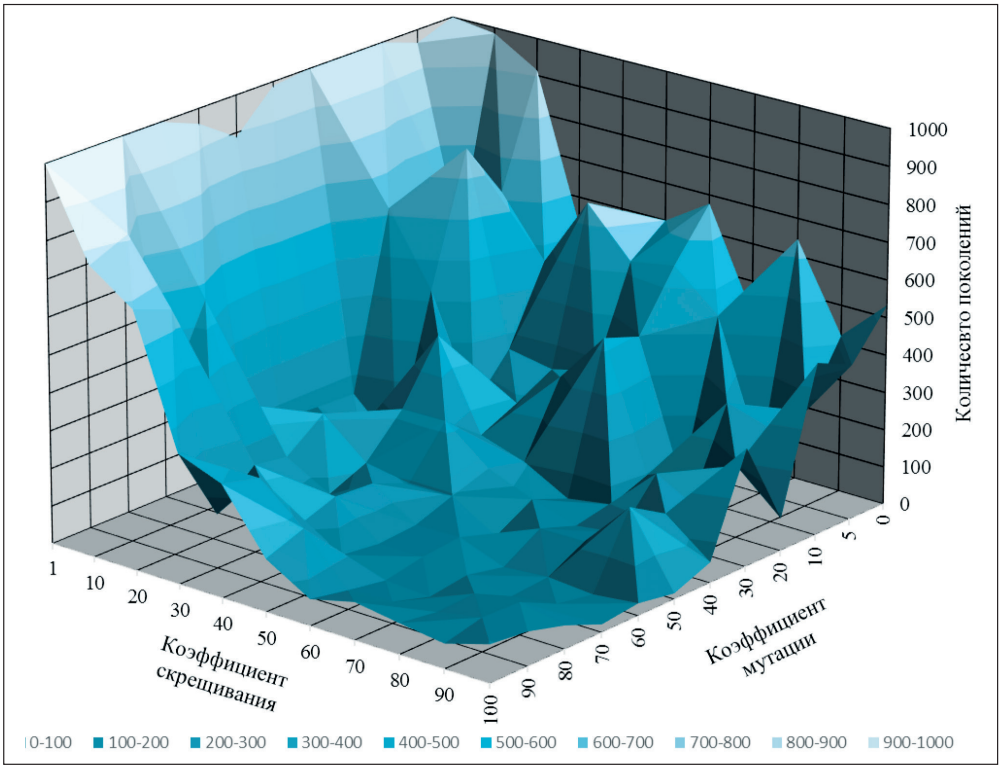


Рис. 5. Диаграмма распределения поколений при различных коэффициентах

Обсуждение

Опираясь на данные осредненных тенденций, представленных на рис. 4 и рис. 5, можно выявить оптимальные интервалы коэффициентов, при которых вне зависимости от выбора другого коэффициента из пары, алгоритм будет достигать приемлемых результатов, а именно K_c = 70 ~ 100 % и K_m = 30 ~ 80 %. Однако, если построить трехмерную диаграмму распределения поколений для данного множества (см. табл. 2), то на получившейся фигуре отчетливо видны «провалы» (минимумы) в количестве поколений, не совпадающие с осредненными тенденциями по исследуемым коэффициентам. Данная диаграмма (см. рис. 6) наглядно демонстрирует обоюдное влияние коэффициентов на работу алгоритма, доказывая тем самым, что настройка одного параметра алгоритма в отрыве от другого не гарантирует высокую эффективность работы данной системы. Операторы скрещивания и мутации применяются параллельно в эволюционном процессе алгоритма и оказывают влияние на работу друг друга. Также наличие «провалов», не характерных для имеющихся оптимальных интервалов, указывает на наличие определенных комбинаций, которые, несмотря на посредственные показатели в осредненных трендах, обеспечивают высокую эффективность работы.

С целью выявления таких комбинаций, а также уточнения оптимальных интервалов коэффициентов с учетом их обоюдного воздействия на алгоритм, произведем экспресс-анализ цветовыми маркерами имеющейся таблицы распределения поколений (см. табл. 2), в результате которого данная таблица принимает вид табл. 3, где отчетливо видны:

1) наличие оптимальных пар коэффициентов, выпадающих из осредненных трендов, таких как $K_{70/10}$, $K_{20/30}$, $K_{60/50}$, $K_{80/20}$ и др.;

2) увеличение плотности наилучших показателей в пределах K_c = 60 ~ 100 % и K_m = 60 ~ 80 %;

3) нелинейность обоюдного воздействия, что подтверждается значительным разбросом значений из диапазона эффективных (градации зеленого маркера).

Таблица 3

Экспресс-анализ распределения поколений при различных коэффициентах

$K_{c/m}$	*m*0	*m*5	*m*10	*m*20	*m*30	*m*40	*m*50	*m*60	*m*70	*m*80	*m*90	*m*100
***c*1**	1000,0	964,2	1000,0	1000,0	1000,0	988,2	888,8	959,4	1000,0	1000,0	1000,0	1000,0
***c*10**	984,2	465,4	465,2	618,6	151,6	155,6	162,0	243,6	562,8	351,4	811,6	768,0
***c*20**	914,2	619,6	774,0	428,2	41,0	128,0	212,2	136,4	152,2	301,2	647,4	686,0
***c*30**	525,0	463,0	262,0	146,4	377,2	218,6	114,4	71,4	60,4	232,6	142,6	344,4
***c*40**	452,0	653,0	240,4	188,0	142,0	220,6	94,4	135,0	141,8	106,0	273,4	300,4
***c*50**	599,4	527,0	269,6	292,4	104,2	127,6	95,4	59,8	51,8	64,4	176,8	139,6
***c*60**	676,4	547,0	395,2	430,4	40,0	79,8	23,4	63,0	53,2	33,6	50,8	70,8
***c*70**	412,6	445,6	38,6	96,8	59,2	44,6	79,4	19,6	41,0	27,0	57,2	100,0
***c*80**	644,6	101,8	284,8	56,2	177,6	60,8	81,2	29,2	21,8	72,0	67,4	82,0
***c*90**	419,0	256,4	249,0	191,8	113,2	147,8	207,0	19,6	38,4	86,4	90,0	66,2
***c*100**	532,6	414,0	458,6	86,6	313,8	55,0	16,0	33,2	21,6	62,6	90,6	101,6

Заключение

Генетические операторы скрещивания и мутации оказывают значительное влияние на эффективность работы алгоритма, достигая 510-кратного улучшения в показателях при правильно подобранных коэффициентах, что обуславливает актуальность данного исследования. На примере решения задачи поиска оптимального маршрута на плоскости [5] наглядно продемонстрирована роль основных генетических параметров и важность правильного выбора коэффициентов. В ходе исследования удалось достигнуть максимальной эффективности работы алгоритма в поставленной задаче путем экспериментального перебора всех возможных коэффициентов, благодаря чему получены следующие результаты:

1) даже при правильной реализации алгоритм может оказаться абсолютно неработоспособным при бездумно выбранных коэффициентах;

2) внедрение операторов скрещивания и мутации положительно сказывается на работе алгоритма;

3) выявлены оптимальные интервалы значений, гарантирующие эффективную работу алгоритма с учетом обоюдного воздействия: K_c = 70 ~100 % и K_m = 60 ~70 %.

4) выявлены оптимальные комбинации, обеспечивающие наилучшие результаты: $K_{60/50}$, $K_{100/50}$, $K_{70/60}$, $K_{90/60}$, $K_{80/70}$, $K_{100/70}$.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Chauvin C.* Human and organisational factors in maritime accidents: Analysis of collisions at sea using the HFACS / C. Chauvin, S. Lardjane, G. Morel, J.-P. Clostermann, B. Langard // Accident Analysis & Prevention. — 2013. — Vol. 59. — Pp. 26–37. DOI: 10.1016/j.aap.2013.05.006.

2. *Tsou M. C.* The study of ship collision avoidance route planning by ant colony algorithm / M. C. Tsou, C. K. Hsueh // Journal of Marine Science and Technology. — 2010. — Vol. 18. — № 5. — Pp. 746–756. DOI: 10.6119/JMST.

3. *Goldberg D. E.* Genetic algorithms and machine learning / D. E. Goldberg, J. H. Holland // Machine learning. — 1988. — Vol. 3. — Is. 2–3. — Pp. 95–99. DOI: 10.1023/A:1022602019183.

4. *Курейчик В. М.* Генетические алгоритмы / В. М. Курейчик // Известия ЮФУ. Технические науки. — 1998. — № 2 (8). — С. 4–7.

5. *Федоренко К. В.* Поиск оптимального маршрута с применением генетических алгоритмов / К. В. Федоренко // Материалы VII Межвузовской научно-практической конференции аспирантов, студентов и курсантов. — СПб., 2017. — С. 344–347.

6. *Басова А. В.* Генетические методы решения задачи оптимального планирования грузовых морских перевозок / А. В. Басова, П. Г. Белявский // Вестник Донского государственного технического университета. — 2011. — Т. 11. — № 5 (56). — С. 630–632.

7. *Шейкин Т. Ю.* Генетический и муравьиный алгоритмы для задачи размещения шлюзов в сети навигационных знаков / Т. Ю. Шейкин // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2013. — № 3 (22). — С. 14–19.

8. *Кузнецов А. Л.* Метод генетических химер для решения задачи рационализации маршрутов морской транспортировки / А. Л. Кузнецов, А. В. Кириченко, Г. Б. Попов // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2017. — Т. 9. — № 3. — С. 456–467. DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-3-456-467.

9. *Holland J. H.* Adaptation in Natural and Artificial Systems: An Introductory Analysis with Applications to Biology, Control and Artificial Intelligence / J. H. Holland. — MIT press, 1992. — 207 p.

10. *Melanie M.* An introduction to genetic algorithms / M. Melanie. — Fifth printing. — The MIT Press, 1999. — 158 p.

11. Back T. Evolutionary algorithms in theory and practice: evolution strategies, evolutionary programming, genetic algorithms / T. Back. — Oxford university press, 1996. — 307 p.

12. *Гладков Л.* Генетические алгоритмы / Л. Гладков, В. Курейчик, В. Курейчик. — М.: Физматлит, 2006. 2017. — 320 с.

13. *Еремеев А. В.* Генетические алгоритмы и оптимизация / А. В. Еремеев. — Омск: Изд-во Омского гос. ун-та, 2008. — 48 с.

REFERENCES

1. Chauvin, Christine, Salim Lardjane, Gaël Morel, Jean-Pierre Clostermann, and Benoît Langard. “Human and organisational factors in maritime accidents: Analysis of collisions at sea using the HFACS.” *Accident Analysis & Prevention* 59 (2013): 26–37. DOI: 10.1016/j.aap.2013.05.006.

2. Tsou, Ming-Cheng, and Chao-Kuang Hsueh. “The study of ship collision avoidance route planning by ant colony algorithm.” *Journal of Marine Science and Technology* 18.5 (2010): 746–756. DOI: 10.6119/JMST

3. Goldberg, David E., and John H. Holland. “Genetic algorithms and machine learning.” *Machine learning* 3.2-3 (1988): 95–99. DOI: 10.1023/A:1022602019183.

4. Kureichik, V. M. “Geneticheskie algoritmy.” *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* 2(8) (1998): 4–7.

5. Fedorenko, K. V. “Poisk optimal’nogo marshruta s primeneniem geneticheskikh algoritmov.” *Materialy VII Mezhvuzovskoi nauchno-prakticheskoi konferentsii aspirantov, studentov i kursantov*. SPb., 2017: 344–347.

6. Basova, Alina V., and Pavel G. Belyavskiy. “Genetic solution methods for problem of stores shipment optimal planning.” *Vestnik of DSTU* 11.5(56): 630–632.

7. Shejkin, T. Ju. “Genetic and ant algorithms for gateway location problem in aids to navigation network.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova* 3(22) (2013): 14–19.

8. Kuznetsov, Aleksandr L., Aleksandr V. Kirichenko, and German B. Popov. “Chimerical genetic algorithm for sea route rationalization.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admiral S.O. Makarova* 9.3 (2017): 456–467. DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-3-456-467.

9. Holland, John H. *Adaptation in natural and artificial systems: an introductory analysis with applications to biology, control, and artificial intelligence*. MIT press, 1992.

10. Melanie, Mitchell. *An introduction to genetic algorithms*. The MIT Press, 1999.

11. Back, Thomas. *Evolutionary algorithms in theory and practice: evolution strategies, evolutionary programming, genetic algorithms*. Oxford university press, 1996.

12. Gladkov, Leonid, Vladimir Kureichik, and Viktor Kureichik. *Geneticheskie algoritmy*. M.: Fismatlit, 2006.

13. Eremeev, A. V. Geneticheskie algoritmy i optimizatsiya. Omsk: Izd-vo Om. gos. un-ta, 2008.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Федоренко Кирилл Владимирович —
аспирант
Научный руководитель:
Оловянников Аркадий Львович
Морской государственный университет имени адмирала Г.И. Невельского
690003, Российская Федерация, Владивосток, ул. Верхнепортовая, д. 50а
e-mail: *akuzolhf@gmail.com*

Оловянников Аркадий Львович —
кандидат технических наук, доцент
Морской государственный университет имени адмирала Г.И. Невельского
690003, Российская Федерация, Владивосток, ул. Верхнепортовая, д. 50а
e-mail: *ark@msun.ru*

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Fedorenko, Kirill V. —
Postgraduate
Supervisor:
Olovyannikov, Arkadii L.
Maritime State University
named after Admiral G.I. Nevelskoi
50a Verkhneportovaya Str., Vladivostok, 690003, Russian Federation
e-mail: *akuzolhf@gmail.com*

Olovyannikov, Arkadii L. —
PhD, associate professor
Maritime State University
named after Admiral G.I. Nevelskoi
50a Verkhneportovaya Str., Vladivostok, 690003, Russian Federation
e-mail: *ark@msun.ru*

Статья поступила в редакцию 13 июля 2017 г.
Received: July 13, 2017.

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

DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-4-724-734

THE ASSESSMENT OF THE OPERATIONAL RESOURCES NEEDED FOR WAREHOUSE OPERATIONS

A. L. Kuznetsov, V. N. Shcherbakova-Slyusarenko, Ya. Ya. Eglit

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

The paper deals with the most important issue of the development and planning procedures of many different objects of the transportation infrastructure, which has a warehouse as an element. This issues the assessment of the resource consumption of any arbitrary stacking equipment, used in stacking operations. General reasoning in the beginning of the paper enables to put forward an assumption that this consumption depends on the volume of the cargo throughput in non-linear way. This causes some doubts on the methodological accuracy of the recommended calculation patterns for the equipment and labor inputs involved in the warehouse activities. These components are among the most considerable expenses connected to the resources supporting the operation of ports, terminals, logistic centers, warehouses etc. This residual seems to grow with the scale of the infrastructural objects, which causes significant economic risks. The authors offer a new methodic for calculation of the resources needed for warehousing operations, based on the advanced technique of the productivity rate assessment of arbitrary stacking machines. The technique assumes the decomposition and detailed analyses of the unit technological cycle of machine, revealing its dependency on the physical parameters of the stack, which are in their turns depend on the cargo through put. The formula dependencies derived in the paper and analytical models built on their basis combined in toasting recalculation method. The results ofthecalculationsbythismethodhaveprovedthesound nessofthe assumedhypnosesand fully complied with the practical measurements performed on the container yards of container ports and terminals. The methodology described in the paper can be recommended for the practice of the design and planning of different transport infrastructural objects having the warehouse in their structure.

Keywords: technological design, resource calculation, warehousing, operational analyses, simulation.

For citation:
Kuznetsov, Aleksandr L., Victoria N. Shcherbakova-Slyusarenko, and Yan Ya. Eglit. "The assessment of the operational resources needed for warehouse operations." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova* 9.4 (2017): 724–734. DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-4-724-734.

УДК 656.615

РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ РАСЧЕТА ПОТРЕБНОСТИ В РЕСУРСАХ, НЕОБХОДИМЫХ ДЛЯ ВЫПОЛНЕНИЯ СКЛАДСКИХ ОПЕРАЦИЙ

А. Л. Кузнецов, В. Н. Щербакова-Слюсаренко, Я. Я. Эглит

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

Рассматривается проблема проектирования и планирования работы объектов транспортной инфраструктуры, имеющих в своем составе склад произвольного назначения, — оценка трудоемкости складских операций, выполняемых той или иной складирующей машиной. На основании приведенных в постановке задачи общих рассуждений выдвигается предположение о том, что эта трудоемкость зависит от объема проходящего через склад грузопотока нелинейным образом. Это выявляет методическую неточность традиционных нормативных рекомендаций по расчету численности парка технологического оборудования и персонала, вовлеченного в складские операции. Данные компоненты являются одними из самых затратных ресурсов, используемых для осуществления технологической деятельности, поддерживающей эксплуатацию портов, терминалов, логистических центров, складов. Показано, что эта неточность будет иметь тенденцию к росту для все более масштабных объектов транспортной инфраструктуры, что может быть связано с высокими экономическими рисками. Авторы предлагают новую методику расчета потребности в ресурсах для складских операций, в основе которых лежит уточненный метод оценки производительности складирующего оборудования. Указанный метод предполагает детальный анализ

единичного технологического цикла абстрактной складирующей машины и его зависимость от физических параметров склада, изменение которых зависит от объема проходящего через него грузопотока.

Полученные формульные зависимости и сформированные на их основе расчетно-аналитические модели сведены в единый метод, расчеты по которому полностью подтвердили справедливость выдвинутой гипотезы и совпали с данными практических замеров, проведенных на складах контейнерных портов и терминалов. Предложена новая методика, которая может быть рекомендована к использованию в практике проектирования и планирования работы различных объектов транспортной инфраструктуры, имеющих в своем составе склады произвольной природы.

Ключевые слова: технологическое проектирование, расчет ресурсов, складские операции, анализ операций, моделирование

Для цитирования:
Кузнецов А. Л. Разработка методики расчета потребности в ресурсах, необходимых для выполнения складских операций / А. Л. Кузнецов, В. Н. Щербакова-Слюсаренко, Я. Я. Эглит // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2017. — Т. 9. — № 4. — С. 724–734. DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-4-724-734.

Введение

Предположим, что нам известен грузопоток Q, проходящий через некоторый грузовой терминал в течение выбранного интервала времени T (год, месяц, неделя, сутки, смена, час). Как правило, операционная модель терминала позволяет оценить число операций, связанных с прохождением этого грузопотока через склад, или $N_{op} = N_{op}(Q)$ [1] – [3]. Этот параметр либо просто пропорционален грузопотоку, либо, по крайней мере, является величиной одного порядка с ним, т. е. $N_{op} = O[Q]$.

Заданный грузопоток Q, при известном среднем сроке хранения груза на терминале $T_{\text{хр}}$, позволяет оценить требуемый объем единовременного хранения на складе с использованием формулы Вильсона или ее модификаций, например, $E = \frac{QT_{\text{хр}}}{365}$ [4] – [8]. Время выполнения единичной складской операции зависит от объема склада, поскольку с ростом геометрических размеров увеличиваются транспортные расстояния в циклах рабочих органов и пробеги установочных движений при переходе между местами выполнения операций. Кроме того, с ростом высоты (ярусности) складирования растет число непроизводительных перемещений для обеспечения доступа к требуемому грузоместу в штабеле [9] – [11]. Исходя из этого в первом приближении можно принять, что длительность операции t_{op} также есть величина одного порядка с объемом грузопотока, т. е. $t_{op} = O[Q]$.

Выполнение необходимого объема операций для обработки заданного грузопотока через склад за выбранный интервал времени требует общего бюджета рабочего времени, определяемого выражением $T_{op} = N_{op}t_{op}$. Отсюда следует, что указанный бюджет времени является величиной, сравнимой с квадратом объема обрабатываемого через терминал грузопотока, или $T_{op} = Q[Q^2]$ — рис. 1.

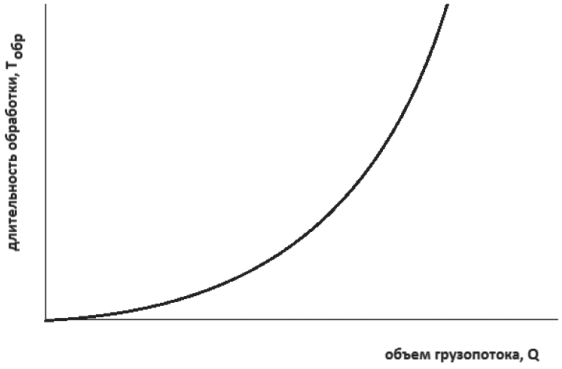


Рис. 1. Объем временнообработки в зависимости от грузопотока

Иными словами, для обработки растущего грузопотока требуется все больше операций, а производительность каждой единичной операции $E = \frac{QT_{\text{хр}}}{365}$ снижается с ростом объема складирования.

Даже в отсутствие внешних ограничений на объем склада он может быть ограничен предельным временем выполнения операции, чаще всего — выборки из штабеля. Точнее, это ограничение касается не всего объема склада, а объема штабеля, который относится к единице оборудования, выполняющего эту операцию. В то же время на практике склад организовывается в виде отдельных штабелей, длина, ширина и высота которых ограничивается технологическими возможностями оборудования, формой отведенной под склад территории, маршрутами технологического транспорта, противопожарными и экологическими требованиями.

Сформированный этими факторами объем штабеля может быть больше объема, установленного предельным значением выполнения операции одной складской машиной. В таком случае возникает задача распределения оптимального количества складских машин, работающих на штабель. С другой стороны, производительность одной машины может превышать значение, требуемое для обслуживания штабеля определенного размера. В данном случае появляется желание использовать одну машину для работы на несколько штабелей. При этом следует иметь в виду, что переход складских машин от одного штабеля к другому возможен, но представляет собой трудоемкую по времени непроизводительную операцию, если даже это допускает мобильность используемого оборудования.

В нормативных документах количество складских машин рекомендуется определять исходя из фиксированного уровня их производительности, по значениям расчетного грузопотока и с поправкой на возможную его неравномерность [10], [11]. Приведенные рассуждения показывают, что этот подход имеет методологические недостатки. Причиной этого служит то, что большинство технологических параметров и характеристик грузопотока связаны между собой не прямыми функциональными зависимостями, а обобщенными. В ряде случаев эти связи выражаются даже более широкими, чем функциональные, отношениями. Напомним, что *функциональной зависимостью* называют однозначное соответствие значения из области допустимых значений функции аргументу из области его допустимых значений: $a = F(b, c, \ldots, y, z)$. Обобщенной записью функции является выражение $\varphi(a, b, c, \ldots, y, z) = 0$, откуда можно (а иногда нельзя) получить отдельные зависимости вида $a = F(b, c, \ldots, y, z)$, $b = F(a, c, \ldots, y, z)$, $z = F(a, b, c, \ldots, y)$. Так, формула $c^2 = a^2 + b^2$, эквивалентная формулам $a^2 = c^2 - b^2$ и $b^2 = c^2 - a^2$, в общем виде запишется как $c^2 - a^2 - b^2 = 0$. В зависимости от того, какие аргументы соотношения известны, а какие следует определить, формулы приобретают тот или иной удобный для расчетов вид.

Формулы, указанные в нормах технологического проектирования, выстроены в определенную логическую последовательность, которая жестко определяет порядок получения входящих в них данных и направление процедуры их преобразования. В то же время, уже отмечалось и будет показано далее, расчетная процедура является немонотонной, итерационной и вариативной, что в значительной мере служит аргументацией для пересмотра общего подхода к расчетным методикам и последовательности их использования.

Исходя ранее изложенного, обобщенная процедура определения полного числа складских машин представляется следующей.

1. Определяется необходимый объем единовременного складирования $E = \frac{QT_{\text{хр}}}{365b}$.

2. Полученный объем складирования, с учетом внешних факторов, разбивается на определенное количество штабелей $E = \sum_{k=1}^{K} E_k$.

3. Оценивается производительность складской операции одной машины $p_{op} = \frac{T}{t_{op}}$ при работе на конкретный штабель.

4. Рассчитывается требуемое количество машин, обеспечивающих обработку грузопотока $Q_T = \frac{Q}{T}$ за выбранный расчетный период T, как $n_k = \frac{Q}{p_{op}}$ при работе на один штабель.

5. Определяется общее число складских машин $n = \sum_{k=1}^{K} n_k$.

Реализация указанной процедуры в первую очередь требует разработки метода оценки производительности складской операции, что и является целью данной работы.

Расчет производительности складских операций

Предположим, что некоторая складирующая машина обслуживает штабель шириной w, длиной L и высотой h ед. (в частности, контейнеров). Ширина грузовой единицы в метрах составляет Δw, длина — ΔL, высота — Δh. Пусть скорость вертикального перемещения грузозахватного органа составляет Θ_h, скорость поперечного перемещения Θ_w, скорость перемещения вдоль штабеля Θ_L. Для усредненного перемещения грузозахватного органа (определенного как перемещение от зоны передачи груза в середину штабеля) требуется преодолеть расстояние по горизонтали $\frac{w \cdot \Delta w}{2}$ и по вертикали $1{,}5h\Delta h$, что потребует времени $\frac{w \cdot \Delta w}{2\Theta_w} + \frac{1{,}5h\Delta h}{\Theta_h}$ (рис. 2).

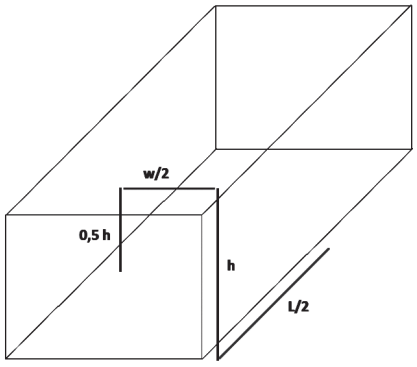


Рис. 2. Траектория среднего цикла перемещения

В случае экспортных операций помещение в штабель требует одного такого движения. В случае импортных операций выборка из контейнерного штабеля потребует в среднем $\frac{h+2}{2}$ подобных движений [12] – [17].

В предположении соотношения операций постановки в штабель и выборки из него 50:50, среднее время движения составит $\left(\frac{w \cdot \Delta w}{2\Theta_w} + \frac{1{,}5h \cdot \Delta h}{\Theta_h}\right) \cdot \left(\frac{h}{4} + 1\right)$. Кроме того, для завершения цикла после перемещения складирующей машины в новое положение потребуется поместить грузозахватное приспособление вновь в условную позицию в середине штабеля, что потребует еще одного движения. Полученное значение отражает технологическую составляющую складской операции. Кроме этого, после завершения этого движения складская машина должна переместиться в новое положение (выполнить установочное движение). В первом приближении длительность этого перемещения может быть оценена величиной $\frac{L \cdot \Delta L}{2\Theta_L}$.

Полное время выполнения операции t_{op} оценивается следующим образом:

$$t_{op} = t_{op}(w, h, L) = \left(\frac{w \cdot \Delta w}{2\Theta_w} + \frac{1{,}5h \cdot \Delta h}{\Theta_h}\right) \cdot \left(\frac{h}{4} + 2\right) + \frac{L \cdot \Delta L}{2\Theta_L}.$$

Рассмотрим теперь штабель некоторого определенного размера $E_{\max} = w_{\max} L_{\max} h_{\max}$. Если в нем находится объем груза E, то использование объема хранения составляет $k_E = \frac{E}{E_{\max}}$. При этом, поскольку площадь одного слоя в штабеле составляет величину $s = w_{\max} L_{\max}$, количество полностью заполненных слоев $h_0 = \left[\frac{E}{s}\right] = \left[\frac{E}{w_{\max} L_{\max}}\right]$, где [...] — есть функция антье, или выделения целой части числа.

В верхнем незаполненном ярусе будет размещаться $E_s = E - h_0 s = E - \left[\frac{E}{w_{\max} L_{\max}}\right] w_{\max} L_{\max} =$ = единиц. В этом незаполненном ярусе количество полностью заполненных рядов будет составлять $L_0 = \left[\frac{E_s}{w_{\max}}\right]$, а в последнем незаполненном ряду будет находиться $E_w = E_s - L_0 w_{\max}$ ед. Иными словами, заполненный штабель будет ограничиваться следующими размерами: его высота, включая верхний неполный слой, будет $h = h_0 + 1$. Полностью заполненных слоев в штабеле будет h_0, в верхнем неполном слое будет полностью заполнено L_0 поперечных рядов, а в последнем (неполном) ряду будет находиться $w_0 = E_w$ ед. (рис. 3).

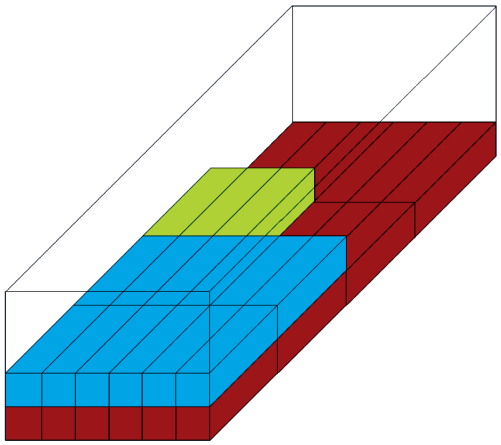


Рис. 3. Заполнение объема штабеля

Точные средние размеры в отношении длины и ширины верхнего, неполного яруса могут быть определены и включены в расчеты, однако с приемлемой для расчетов точностью можно заменить реальный штабель минимальным по объему вмещающим его параллелепипедом с размерами $w_{\max} L_{\max} h$. Возьмем в качестве независимой входной переменной грузопоток Q, проходящий через терминал. При среднем сроке хранения груза на терминале $T_{\text{хр}}$ требуемый объем единовременного хранения на складе составит $E = \frac{Q T_{\text{хр}}}{365} = q_{\text{сут}} T_{\text{хр}}$. Требуемое для обработки этого грузопотока в сутки число операций составляет $N_{op} = N_{op}(Q) = q_{\text{сут}} = \frac{Q}{365}$, а каждая из этих операций, в свою очередь, требует для своего выполнения времени t_{op}. Отсюда полный бюджет времени, необходимый для выполнения суточного объема операций,

$$T_Q = q_{\text{сут}} t_{op} = \frac{Q}{365} \cdot t_{op}\left(Q, T_{\text{хр}}, w_{\max}, L_{\max}\right).$$

Если увеличивать значение переменной Q, то, как было показано, пропорционально будет расти как требуемое суточное значение количества операций, так и среднее время выполнения каждой из них.

Для доказательства валидности модели предположим, что ширина и длина штабеля ограничены, а высота складирования не ограничена и определяется требуемым размером склада

(т. е. единственный штабель склада неограниченно растет вверх). Параметры расчетного примера сведены в табл. 1.

Таблица 1

Параметры расчетного примера

Наименование	Обозначение	Значение	Единицы измерения
Ширина штабеля	$w_{\max}$	6	шт.
Длина штабеля	$L_{\max}$	40	шт.
Высота штабеля	$h_{\max}$	4	шт.
Максимальный объем штабеля	$E_{\max}$	960	шт.
Ширина контейнера	d_w	2,5	м
Длина контейнера	d_L	12	м
Высота контейнера	d_h	3	м
Время нацеливания	t_{pos}	15	с
Скорость вертикального перемещения	v_h	25	м/мин
Скорость поперечного перемещения	v_w	30	м/мин
Скорость продольного перемещения	v_L	200	м/мин
Средний срок хранения	$T_{\text{хр}}$	7	сут

На рис. 4 – 7 показаны изменения длительности выполнения складской операции, производительность складской операции, бюджета времени обработки суточного объема и требуемое количество складских машин как функций от грузопотока, проходящего через склад для штабеля, характеристики которого приведены в табл. 1.

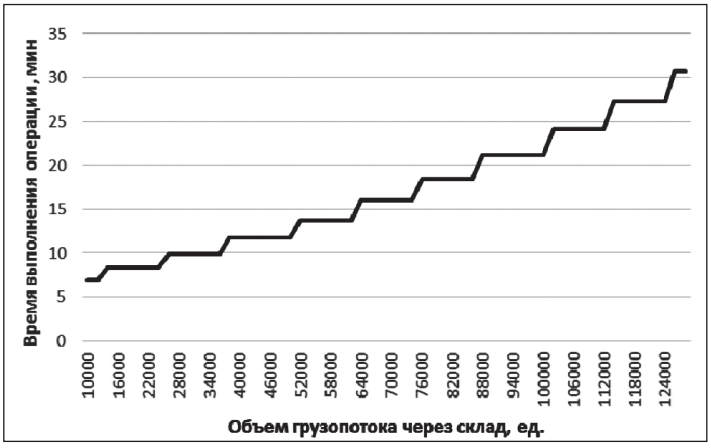


Рис. 4. Изменение длительности складской операции при росте грузопотока через склад

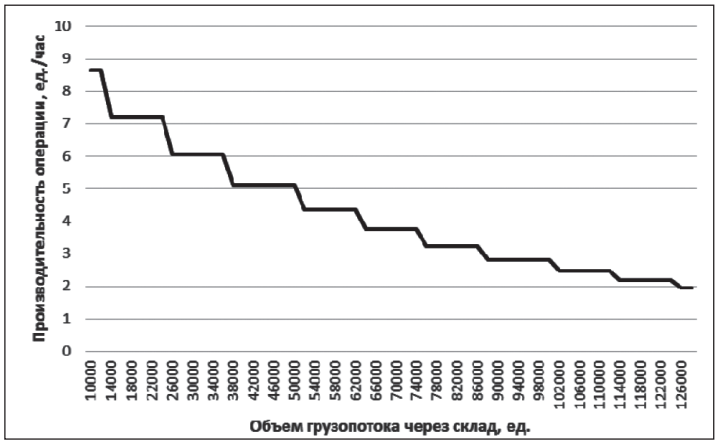


Рис. 5. Изменение производительности складской операции при росте грузопотока через склад

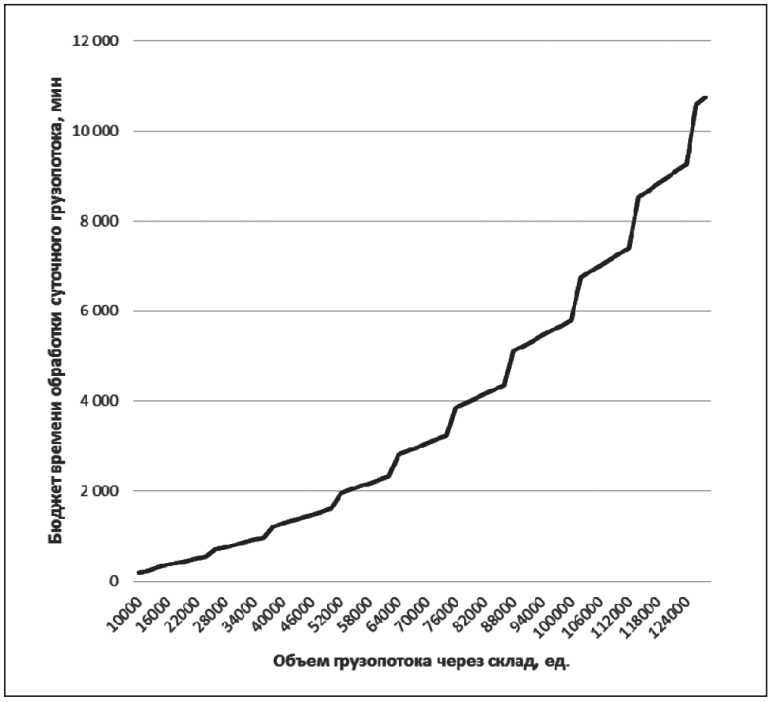


Рис. 6. Бюджет времени на обработку суточного грузопотока через склад

Если складская машина работает в течение $N_{СМ}$, каждая по $n_{СМ}$ часов, то ее суточный бюджет составит $T_m = N_{СМ} n_{СМ}$. Если взять значения, приведенные в табл. 2, то рост требуемого числа складских машин в зависимости от грузопотока для расчетного примера будет таким, как показано на рис. 7.

Таблица 2

Параметры времени работы машины

Наименование	Значение
Число смен в сутках	3
Число часов в смене	7
Число часов в сутках	24
Бюджет времени машины, ч	1260



Рис. 7. Требуемое число складских машин как функция грузопотока

Анализ результатов (см. рис. 4 – 7) позволяет сделать вывод о валидности предложенной расчетной модели: с ростом объема грузопотока через склад бюджет времени, требуемый для выполнения складской операции, растет квадратично, производительность операции, выполняемой одной машиной, падает, требуемое число машин растет нелинейно. В то же время в указанной аналитической модели не учитывается ограничение высоты складирования, устанавливаемое конкретными складскими машинами и заставляющее переходить от одного штабеля к нескольким.

Случай склада из нескольких штабелей

Если на один штабель для работы поставлены две и более складирующих машины, то операционный объем обслуживания каждой можно условно считать равным пропорциональной части полного объема. В этом случае время выполнения складской операции на штабеле будет соответственно сокращаться по сравнению с использованием одной машины.

Если расчетный объем складирования превышает допустимый объем штабеля, формируемый техническими ограничениями принятой складской машины (w и h) и размерами территории (L), то на складе должно быть сформировано несколько отдельных штабелей. Пусть, например, требуемый объем складирования составляет величину E, а максимальный объем штабеля есть E_0. В таком случае, склад должен быть организован в виде отдельных операционных штабелей, число которых определяется соотношением $K \geq \left(\frac{E}{E_0} \right) + 1$. При этом средняя загрузка каждого штабеля составит величину $E_k = \frac{E}{K}$, $k = \overline{1, K}$. Все результаты, полученные ранее, могут быть полностью перенесены на этот случай. При этом следует подчеркнуть, что нелинейный (квадратичный) рост бюджета времени операций и снижение производительности складской машины имеет место лишь в пределах одного штабеля. Исходя из этого производится оценка числа машин, требуемых для работы над одним штабелем. Рост общего грузопотока через склад приводит к линейному росту числа штабелей и, как следствие, числа распределенных для работы на них складских машин.

С другой стороны, объем или загрузка каждого из этих операционных штабелей может оказаться слишком малыми, чтобы закреплять за каждым из них складирующую машину. В таком случае, кроме принятых во внимание в проведенных расчетах технологической и установочной компонент рабочего цикла операции, появляется еще одна составляющая: время перемещения от штабеля к штабелю. В случае операции помещения в штабель этого перемещения можно избежать, в случае выборки из штабеля чисто вероятностные механизмы позволяют оценить адресацию к тому или иному штабелю как $\frac{1}{M}$, где M — количество обслуживаемых одной машиной штабелей. Таким образом, вероятность остаться в том же штабеле составляет $0{,}5\left(1 + \frac{1}{M}\right) = \frac{M+1}{2M}$. Отсюда вероятность перемещения в другой штабель составит $1 - \frac{M+1}{2M} = \frac{2M - M - 1}{2M} = \frac{M-1}{2M}$.

На практике рациональное планирование операций может минимизировать эти перемещения, что можно учесть введением коэффициента управления $k_{\text{упр}} < 1$. В таком случае доля операций, требующих перемещения от штабеля к штабелю, составит $k_{\text{упр}} \frac{M-1}{2M}$.

Если среднее время перемещения между штабелями склада составляет t_{tr}, то к бюджету времени для выполнения операций добавится компонента, связанная с выполнением этой операции, т. е. $k_{\text{упр}} \frac{M-1}{2M} q_{\text{сут}} t_{tr}$. С учетом этого полный бюджет времени, необходимый для выполнения суточного

объема операций с переходами между штабелями, составит $T_Q = q_{\text{сут}}\left(t_{op} + k_{\text{упр}}\frac{M-1}{2M}t_{tr}\right)$. Отсюда требуемое для выполнения суточного объема операций число машин определяется как $m = \left(\frac{T_Q}{N_{\text{СМ}}n_{\text{СМ}}}\right)+1$.

При этом коэффициент использования этих машин составит $k_m = \frac{T_Q}{N_{\text{СМ}}n_{\text{СМ}}m}$.

При этом следует подчеркнуть, что нелинейный (квадратичный) рост бюджета времени операций и снижение производительности складской машины имеет место лишь в пределах одного штабеля. Исходя из этого производится оценка числа машин, требуемых для работы над одним штабелем. Рост общего грузопотока через склад приводит к линейному росту числа штабелей и, как следствие, числа распределенных для работы на них складских машин.

Выводы

1. Авторами было сделано предположение о нелинейном (квадратичном) росте трудоемкости складских операций от грузопотока через него.

2. С учетом этого было указано на методологическую неточность общепринятой нормативной методики определения численного состава технологического оборудования и сформулирована уточненная методика без этих недостатков.

3. Основу методики составляет более точный расчет единичного технологического цикла произвольной складирующей машины, для чего в статье описывается соответствующий метод.

4. Практические расчеты по предложенному методу показывают полное совпадение с выдвинутой гипотезой о характере роста трудоемкости складских операций, что является достаточным основанием для подтверждения ее справедливости.

5. Предложенная новая методика может служить полезным инструментом в практике проектирования и планирования работы различных объектов транспортной инфраструктуры, имеющих в своем составе склады произвольной природы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Кузнецов А. Л.* Базовая модель логистических потоков через контейнерный терминал / А. Л. Кузнецов, Е. Ю. Козлова // Эксплуатация морского транспорта. — 2008. — № 2. — 18–20.

2. *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.

3. *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. 3–19.

4. Port development. A handbook for planners in developing countries. — Second edition. — New York: UNCTAD, 1985. — 228 p.

5. *Басов Е. А.* Сравнительная характеристика доходности по операциям перевалки и хранения контейнеров на терминале / Е. А. Басов // Транспортное дело России. — 2013. — № 6. — С. 197–198.

6. *Уотерс Д.* Логистика. Управление цепью поставок: пер. с англ. / Д. Уотерс. — М.: ЮНИТИ-ДАНА, 2003. — 503 с.

7. *Parola F.* The Impact of Multiple-site Acquisitions on Corporate Growth Patterns of International Terminal Operators / F. Parola, T. Nottenboom, G. Satta, J. P. Rodrigue // International Journal of Shipping and Transport logistics. — Vol. 7. — Is. 5. — Pp. 621–648. DOI: 10.1504/IJSTL.2015.072018.

8. *Guerrero D.* The waves of containerization: shifts in global maritime transportation / D. Guerrero, J. P. Rodrigue // Journal of Transport Geography. — 2014. — Vol. 34. — Pp. 151–164. DOI: 10.1016/j.jtrangeo.2013.12.003.

9. *Кузнецов А. Л.* Сравнение различных методик оценки требуемой вместимости склада при технологическом проектировании контейнерных терминалов / А. Л. Кузнецов, Е. Ю. Козлова // Эксплуатация морского транспорта. — 2008. — № 4. — С. 9–14.

10. *Кузнецов А. Л.* Оптимизация высоты складирования контейнеров / А. Л. Кузнецов // Речной транспорт (XXI век). — 2008. — №2. — С. 91–93.

11. *Кузнецов А. Л.* Количество перемещений контейнеров как функция от высоты складирования / А. Л. Кузнецов, В. А. Погодин // Контейнерный бизнес. — 2008. — № 7 (17). — С. 26–29.

12. РД 31.3.05-97. Нормы технологического проектирования морских портов. — М.: Изд-во СоюзморНИИпроект, 1998. — 177 с.

13. РД 31.3.01.01-93. Руководство по технологическому проектированию морских портов. — М.: Изд-во СоюзморНИИпроект, 1993. — 177 с.

14. *Kuznetsov A.* Do boxes really have a “digging” effect? / Cargo systems / A. Kuznetsov. — 2008. — Pp. 42–43.

15. *Cho H.* Determinants and effects of logistics costs in container ports: the transaction cost economics perspective / H. Cho // The Asian Journal of Shipping and Logistics. — 2014. — Vol. 30. — Is. 2. — Pp. 193–215. DOI:10.1016/j.ajsl.2014.09.004.

16. *Bandara Y. M.* Improving logistics management using foldable/collapsible containers: a case study / Y. M. Bandara, V. Garaniya, C. Chin and 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.

17. *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.

REFERENCES

1. Kuznetsov, A. L., and E. Yu Kozlova. “Basic model of logistical flows through container terminal.” *Jekspluatacija morskogo transporta* 2 (2008): 18–20.

2. 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.

3. Kuznetsov, A.L., V.A. Pogogin, and Y.B. Spasskiy. “Storage capacity calculation taking into account the irregularity of land transport operations.” *Jekspluatacija morskogo transporta* 4 (2010): 3–9.

4. *Port development. A handbook for planners in developing countries.* Second edition. New York: UNCTAD, 1985.

5. Basov, E. “Comparative study of the economic efficiency of the handling and storage operation on container terminals.” *Transport business of Russia* 6 (2013): 197–198.

6. Uoters, D. *Logistika. Upravlenie tsep’yu postavok*. M.: YuNITI-DANA, 2003.

7. Parola, Francesco, Theo Notteboom, Giovanni Satta, and Jean-Paul Rodrigue. “The impact of multiple-site acquisitions on corporate growth patterns of international terminal operators.” *International Journal of Shipping and Transport Logistics* 7.5 (2015): 621–648. DOI: 10.1504/IJSTL.2015.072018.

8. Guerrero, David, and Jean-Paul Rodrigue. “The waves of containerization: shifts in global maritime transportation.” *Journal of Transport Geography* 34 (2014): 151–164. DOI: 10.1016/j.jtrangeo.2013.12.003.

9. Kuznetsov, A. L., and E. J. Kozlova. “The comparative study of different assessment techniques for the stack size at the container terminal’s technologic design stage.” *Jekspluatacija morskogo transporta* 4 (2008): 9–14.

10. Kuznetsov, A. L. “Optimizatsiya vysoty skladirovaniya konteinerov.” *River transport (XXIst century)* 2 (2008): 91–93.

11. Kuznetsov, A. L., and V. A. Pogodin. “Kolichestvo peremeshchenii konteinerov kak funktsiya ot vysoty skladirovaniya.” *Konteinernyi biznes* 7(17) (2008): 26–29.

12. Russian Federation. Guidance document RD 31.3.05-97. Engineering Design Standards for Seaports. M.: SoyuzmorNIIproekt, 1998.

13. Russian Federation. Guidance document RD 31.3.01.01-93. Guide to Design of Seaports.

14. Kuznetsov A. “Do boxes really have a “digging” effect? / Cargo systems.” (2008): 42–43.

15. Cho, Hyuk-soo. "Determinants and effects of logistics costs in container ports: the transaction cost economics perspective." *The Asian Journal of Shipping and Logistics* 30.2 (2014): 193–215. DOI:10.1016/j.ajsl.2014.09.004.

16. Bandara, Yapa Mahinda, Vikram Garaniya, Christopher Chin, and Zhi Hui 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.

17. Schepler, Xavier, Stefan Balev, Sophie Michel, and Éric 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.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

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

Щербакова-Слюсаренко Виктория Николаевна —
кандидат технических наук
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова»
198035, Российская Федерация, Санкт-Петербург, ул. Двинская, 5/7
e-mail: *kaf _pgt@gumrf.ru*

Эглит Ян Янович —
доктор технических наук, профессор
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова»
198035, Российская Федерация, Санкт-Петербург, ул. Двинская, 5/7
e-mail: *JeglitJJ@gumrf.ru*

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Kuznetsov, Aleksandr L. —
Dr. of Technical Sciences, professor
Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping
5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg, 198035, Russian Federation
e-mail: *thunder1950@yandex.ru*, *kaf _pgt@gumrf.ru*

Shcherbakova-Slyusarenko, Victoria N. —
PhD
Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping
5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg, 198035, Russian Federation
e-mail: *kaf _pgt@gumrf.ru*

Eglit, Yan Ya. —
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: *JeglitJJ@gumrf.ru*

Статья поступила в редакцию 15 июля 2017 г.
Received: July 15, 2017.

ВОДНЫЕ ПУТИ СООБЩЕНИЯ И ГИДРОГРАФИЯ

DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-4-735-743

A STUDY OF THE FACTORS INFLUENCING NAVIGATIONAL ACCIDENTS IN SHALLOW WATER

A. B. Afonin, I. Ju. Korolev, A. L. Tezikov

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

The article developed common approaches to assessing the impact of landing of the vessel on the rocks and touch the ground in shallow water conditions of the Arctic shelf. The importance of this task to the waters of the Northern sea route, associated with the growth of Maritime cargo turnover, increased tonnage, the development of new ways, including a shallow one. Analytical review of scientific publications devoted to this issue. A brief description of the two main areas that are used to solve the problem of preventing landings ashore and touch the ground. Developed by air classification with local uplifts of the bottom. As a classification of signs is proposed to use horizontal dimensions elevations relative to the distance between the tacks of hydrographic surveys, their navigational hazards and the probability of detecting the uplift while performing hydrographic works. Introduced and proved the concept of "small bottom" and its main characteristics consists in the fact that they may not be discovered in the process of performing hydrographic surveys and is not marked on the navigation map, to provide a source of navigational hazards. A brief description of the principles of mapping of the bottom topography on nautical maps used in their construction in cartographic production, and also the list associated with the production technology assumptions and the forced distortion of the elements of the bottom topography. Highlighted the discrepancy between the threat to a vessel with a given draught of isobaths with standard digitized isobaths and the magnitude of allowable offset the standard isobaths and distortion in the process of cartographic generalization display items load cards. The technique of an estimation of the probability of missing local uplifts of the bottom when performing hydrographic surveys. A criterion that allows local uplift of the bottom attributed to the dangerous navigation of underwater obstacles. Available analytical dependences, allowing to estimate the number missed in the process of shooting the elevations of the bottom for a given probability of detection. Practical importance of the problem being solved for navigation in shallow waters of the Arctic shelf, as well as the scientific novelty of the proposed solutions. Identified key areas for future research.

Keywords: Northern sea route, a shallow, air crash, grounding, probability, hydrographic surveying, marine navigation map.

For citation:
Afonin, Andrej B., Ivan Ju. Korolev, and Aleksandr L. Tezikov. "A study of the factors influencing navigational accidents in shallow water." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 9.4 (2017): 735–743. DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-4-735-743.

УДК 528.47

ИССЛЕДОВАНИЕ ФАКТОРОВ, ВЛИЯЮЩИХ НА НАВИГАЦИОННУЮ АВАРИЙНОСТЬ В УСЛОВИЯХ МЕЛКОВОДЬЯ

А. Б. Афонин, И. Ю. Королёв, А. Л. Тезиков

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

В статье разрабатываются общие подходы к оценке влияния посадки судна на мель и касания грунта в условиях мелководья арктического шельфа. Отмечается важность этой задачи для акватории Северного морского пути, связанная с ростом морского грузооборота, увеличением тоннажа судов, освоением новых путей, в том числе мелководных. Приводится аналитический обзор научных публикаций,

посвящённых этой проблематике. Даётся краткая характеристика двух основных направлений, используемых для решения задачи предупреждения посадок на мель и касания грунта. Разработана навигационная классификация локальных поднятий дна. В качестве классификационных признаков предложено использовать горизонтальные размеры поднятий по отношению к междугалсовому расстоянию гидрографической съёмки, степень их навигационной опасности и вероятность обнаружения поднятия при выполнении гидрографических работ. Введено и обосновано понятие «малые формы рельефа дна» и их основные особенности, состоящие в том, что они могут быть не обнаружены в процессе выполнения гидрографической съёмки и не нанесены на навигационную морскую карту, но при этом представлять собой источник навигационной опасности. Дается краткое описание принципов отображения рельефа дна на навигационных морских картах, используемых при их построении в картографическом производстве, а также перечень связанных с технологией производства допущений и вынужденных искажений элементов рельефа дна. Особое внимание обращено на несовпадение опасных для судна с заданной осадкой изобат со стандартно оцифрованными изобатами, а также на величину допустимого смещения стандартных изобат и искажений, вносимых в процессе генерализации картографического отображения элементов нагрузки карт. Приведена методика оценки вероятности пропуска локальных поднятий дна при выполнении гидрографической съёмки. Установлен критерий, который позволяет локальные поднятия дна отнести к множеству опасных в навигационном отношении подводных препятствий. Предлагаются аналитические зависимости, позволяющие производить оценку количества пропущенных в процессе съёмки поднятий дна при заданной вероятности их обнаружения. Отмечается практическая важность решаемой задачи для плавания судов на мелководье арктического шельфа, а также научная новизна предложенных решений. Определены основные направления дальнейших исследований.

Ключевые слова: Северный морской путь, мелководье, навигационная авария, посадка на мель, вероятность, гидрографическая съемка, навигационная морская карта.

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

Введение

На трассах Северного морского пути (СМП) изменяются условия судоходства, увеличивается тоннаж и осадка судов, осваиваются новые судоходные пути, в том числе мелководье арктического шельфа. Локальные поднятия дна, которые для судов с малой осадкой не представляли опасность, для судов с большой осадкой являются реальным препятствием. Проблема обеспечения безопасного плавания крупнотоннажных судов на арктическом мелководье связана с решением комплекса научных задач, связанных с принципиально новым классом подводных препятствий, образованных малыми формами рельефа. Особенность таких форм состоит в том, что они плохо обнаруживаются при выполнении традиционной гидрографической съемки подводного рельефа системой параллельных галсов, а потому отсутствуют на картах и в соответствующих морфогенетических классификациях [1].

Принято считать [2] – [4], что посадки судов на мель и касание грунта относятся к одним из наиболее распространённых видов навигационных аварийных происшествий на море. Исследованию и анализу этих происшествий посвящено значительное количество работ, в которых содержатся статистические данные происшествий, их причины и общие рекомендации для судоводителей по предотвращению этого вида аварий. При этом используются два основных подхода.

Первый подход относится к тактической задаче расхождения судна с обозначенными на навигационной карте локальными поднятиями дна, являющимися подводными препятствиями для судов с заданной осадкой. Задача, как правило, сводится к оценке влияния ошибок маневрирования, определения места судна и дистанции до опасности с учетом вероятности аварии. Допускается, что форма, размеры и местоположение опасности определены точно. Примером реализации такого подхода служат работы [5] – [8].

Второй подход связан с задачей определения оптимальной подробности гидрографической съемки и оценки вероятности обнаружения локальных поднятий дна. В качестве опасности

принимается модель поднятия дна, имеющая упрощённую геометрическую форму (например, в виде отдельных точек, сферических или эллиптических сегментов, и их распределений). За оптимальную подробность гидрографической съёмки принимается съемки с такой дискретностью измерений, при которой все локальные поднятия дна, заданные моделью, обнаруживаются. В случае, когда подробность съёмки отличается от оптимальной, обнаружение части локальных поднятий дна не гарантируется. Пропущенные поднятия не отображаются на навигационных морских картах (НМК). Разработке математического аппарата и методики оценки вероятности пропуска опасных глубин посвящены исследования [9] – [12].

Математический аппарат и методика количественной оценки вероятности пересечения пути судна с опасностью предложены в работах [13] – [15]. Показано, что вероятность пересечения пути судна с опасностью зависит от ширины полосы движения судна, формы, размеров, количества и расположения опасностей в акватории, а также вероятности их присутствия.

Все подводные препятствия скрыты от непосредственного визуального наблюдения и подразделяются на два вида:

– препятствия, обнаруженные в процессе гидрографической съёмки и нанесённые на карту;

– препятствия, не обнаруженные в процессе гидрографической съёмки и, следовательно, на карту не нанесённые.

В задачах расхождения судна с опасностями рассматривается только первый вид препятствий. Расхождение судна с известным препятствием теоретически подробно проработано. Навигационные аварии, связанные с препятствиями первого вида, в основном порождаются человеческим фактором. Влияние человеческого фактора на аварийность судов представляет собой самостоятельную проблему, которая выходит за рамки настоящей работы.

В задачах по оценке вероятности пропуска опасных глубин основное внимание уделяется второму виду препятствий. Со временем гидрографическая изученность акватории повышается, совершенствуются методы и средства обследования дна, что приводит к сокращению доли происшествий, связанных с посадкой на неизвестные мели. Анализ совместного влияния подводных препятствий обоих видов на вероятность посадки судна на мель до настоящего времени не проводился.

Модели малых форм рельефа нуждаются в уточнении. Представление их в виде точечных объектов обосновано на картах мелкого масштаба. На картах крупного масштаба следует учитывать их форму и размеры. Малые формы рельефа на мелководье порождают новый класс подводных препятствий, которые плохо обнаруживаются гидроакустическими средствами и недостаточно полно и подробно отображаются на картах. Для малых форм рельефа методика расчёта вероятности посадки судна на мель или касания грунта нуждается в разработке.

Настоящая работа посвящена теоретическим вопросам, связанным с отображением малых форм рельефа на НМК, в том числе тех, которые могут представлять опасность для судоходства, а также вероятности обнаружения малых форм рельефа при выполнении гидрографической съемки.

Рассмотрены следующие вопросы:

– особенности отображения рельефа дна на НМК;

– классификация локальных поднятий по критерию возможности их обнаружения;

– оценка вероятности пропуска локальных поднятий дна.

Теоретическая основа метода исследования

К малым формам относятся поднятия дна, горизонтальные размеры которых находятся в пределах от одного метра до нескольких сотен метров. Теорема В. А. Котельникова [16] устанавливает связь интервала дискретизации отсчётов с точностью восстановления исходной функции. В соответствии с ней при выполнении съёмки системой параллельных галсов [17] с междугалсовым расстоянием L надёжно обнаруживаются формы рельефа, имеющие минимальные горизонтальные размеры D, равные $2L$.

Формы рельефа, имеющие размеры $D < 2L$, не могут быть надёжно определены. Формы рельефа, имеющие размеры $D < L$, с высокой степенью вероятности могут быть пропущены. Принадлежность поднятий рельефа к малым формам определяется условием $D < L$. Правила отображения рельефа дна на НМК регламентируются нормативными документами национальной гидрографической службы [18], [19]. Подводный рельеф изображается отметками глубин, изобатами и условными знаками. Условными знаками отмечаются элементы рельефа, которые не могут быть выражены изобатами. Частота нанесения отметок глубин на НМК зависит от диапазона глубин и сложности рельефа. Для мелководных участков шельфа морей СМП с глубинами до 30 м этот интервал составляет от 0,5 до 2 см в масштабе карты.

На НМК шельфовой зоны СМП проводятся изобаты, имеющие следующие стандартные значения 2, 5, 10, 20, 30, 50, 100, 200 м. Для отмелей и плоских равнин проводятся дополнительные изобаты (например, 3, 4, 6, 8 м). Для гармонизации изображения рельефа отдельные изобаты могут быть смещены на величину до четверти их заложения. Мелководные участки шельфа морей СМП выровнены и имеют малые углы наклона дна. Поэтому смещение изобат может достигать значения в десятки морских миль.

В практике судовождения для судна с заданной осадкой d используется понятие «опасная изобата» $H(d)$ [20]. Значение опасной изобаты, как правило, не совпадает со стандартной оцифровкой изобат на НМК, поэтому возникает задача построения опасной изобаты индивидуально для каждого судна. Построение опасных изобат проводится с использованием методов интерполирования относительно стандартных изобат, которые могут иметь значительные смещения, как было отмечено ранее, и окружающих их глубин. Горизонтальные размеры опасной изобаты $H(d_i)$ зависят от факторов, связанных с особенностями технологии построения картографического отображения подводного рельефа и дискретным характером съемки рельефа дна.

В соответствии и Правилами гидрографической службы [17], [18] в диапазоне глубин от 0 до 50 м на шельфе рекомендованное междугалсовое расстояние должно находиться в диапазоне от 0,5 до 1,0 км. Такая дискретность обеспечивает надежное обнаружение локальных форм рельефа с горизонтальными размерами от одного до двух километров. При этом признаками возможного повышения дна и существования естественных навигационных опасностей в междугалсовом пространстве являются глубины, отличающиеся от окружающих глубин в меньшую сторону в следующих пределах:

– от 3 до 10 м включительно — более чем на 0,9 м;
– свыше 10 до 20 м включительно — 1,5 м;
– свыше 20 до 30 м включительно — 2,5 м;
– свыше 30 м — более чем на 10 % при плавном рельефе дна;
– более чем на 20 % при холмистом рельефе дна;
– более чем на 30 % при сложном рельефе дна.

В том случае, когда отклонения глубин на промерных галсах превышают указанные величины, промер сгущается с целью обнаружения минимальной глубины и определения размеров навигационной опасности. В противном случае промер не сгущается. В условиях мелководья, при минимальном запасе воды под килем, эти правила нуждаются в корректировке. Дискретная схема измерений во многих случаях может приводить к пропуску локальных поднятий дна, которые могут представлять навигационную опасность особенно для крупнотоннажных судов.

Результаты

В общем случае множество локальных поднятий дна $\{N\}$ на ограниченной акватории

$$\{N\} = \{n_o\} + \{n_u\}, \quad (1)$$

где $\{n_o\}$ — множество обнаруженных и нанесённых на карту локальных поднятий дна;

$\{n_u\}$ — множество не обнаруженных и, следовательно, не нанесённых на карту локальных поднятий дна.

Множество $\{n_o\}$, в свою очередь, состоит из суммы трёх подмножеств:

$$\{n_o\} = \{n_1\} + \{n_2\} + \{n_3\}, \quad (2)$$

где $\{n_1\}$ — подмножество локальных поднятий дна, горизонтальные размеры которых превышают удвоенное значение междугалсового расстояния, $D > 2L$;

$\{n_2\}$ — подмножество локальных поднятий дна, горизонтальные размеры которых удовлетворяют неравенству $L < D < 2L$;

$\{n_3\}$ — подмножество локальных поднятий дна, горизонтальные размеры которых не превышают величину междугалсового расстояния, $D < L$.

Элементы подмножества $\{n_1\}$ обнаруживаются в процессе съёмки с вероятностью $p_1 = 1$. Форма, размеры и минимальные глубины таких поднятий определены.

Элементы подмножества $\{n_2\}$ обнаруживаются в процессе съёмки с вероятностью $p_2 = 1$. Форма, размеры и минимальные глубины над такими поднятиями определяются только в результате дополнительного обследования.

Элементы подмножества $\{n_3\}$ обнаруживаются в процессе съёмки с вероятностью $p_3 < 1$. Форма, размеры и минимальные глубины над такими поднятиями определяются только в результате дополнительного обследования.

Множество $\{n_u\}$ содержит необнаруженные локальные поднятия дна, горизонтальные размеры которых не превышают величину междугалсового расстояния, $D < L$. Обозначим вероятность пропуска таких поднятий буквой p_u.

Обнаружение малых форм, имеющих размеры $D < L$, и их пропуск образуют полную группу, поэтому $p_u = 1 - p_3$.

Вероятность p_3 зависит от соотношения дискретности съёмки L, формы и размеров поднятий дна D.

Объединение множеств $\{n_3\}$ и $\{n_u\}$ обозначим $\{N_S\}$. Для оценки количества необнаруженных в процессе съёмки поднятий дна n_u, составляющих множество $\{n_u\}$, предложено использовать формулу

$$n_u = n_3 \cdot \left(\frac{1}{p_3} - 1 \right) \quad (3)$$

Оценка вероятности величины n_u при условии обнаружения n_3 поднятий дна выполняется по формуле

$$P_{N_S}(n_3) = C_{N_S}^{n_3} \cdot p_3^{n_3} (1 - p_3)^{n_u}, \quad (4)$$

где $C_{N_S}^{n_3} = \dfrac{N_S!}{n_3! \cdot n_u!}$.

Зависимости (3) и (4) могут быть использованы для вычислений сложных событий при условии, что вероятность p_3 представляет собой постоянную величину. Однако, так как горизонтальные размеры локальных поднятий $\{N_S\}$ могут изменяться от 0 до L, то и вероятность p_3 также может изменяться в пределах, зависящих от этого интервала. Вероятность обнаружения поднятий дна, имеющих большие горизонтальными размеры, имеет большее значение, чем вероятность обнаружения поднятий дна, имеющих малые горизонтальные размеры. При этом для вероятности p_3 должны выполняться следующие граничные условия:

$$p_3 \to 1 \text{ при } D \to L; \quad (5)$$

$$p_3 \to 0 \text{ при } D \to 0. \quad (6)$$

С учетом того, что в общем случае вероятность p_3 зависит от горизонтальных размеров препятствий D и междугалсового расстояния L, выражения (3) и (4) примут следующий вид:

$$n_u = n_3 \cdot \left(\frac{1}{p_3(D,L)} - 1 \right); \tag{7}$$

$$P_{N_S}(n_3,\ D,\ L) = C_{N_S}^{n_3} \cdot p_3^{n_3}(D,\ L) \cdot \left(1 - p_3(D,\ L)\right)^{n_u}. \tag{8}$$

При выполнении граничных условий (5) и (6) решениями уравнений (7) и (8) служат следующие соотношения:

– при $p_3 = 1$

$$n_u = 0; \tag{9}$$

$$P_{N_S}(n_3,\ D \geq L) = 1; \tag{10}$$

– при $p_3 = 0$

$$n_u \to \infty; \tag{11}$$

$$P_{N_S}(n_3,\ D \geq L) = 0. \tag{12}$$

Из выражений (9) и (10) следует, что при высокой вероятности обнаружения пропущенные поднятия отсутствуют. Из выражений (11) и (12) следует, что при нулевой вероятности обнаружения все поднятия, которые могут находиться в районе обследования, относятся к классу необнаруженных поднятий. После выполнения приведённых оценок (7) и (8) требуется классифицировать выявленные поднятия дна по степени их навигационной опасности по отношению к судам.

В качестве критерия используются соотношения осадки судна d, допустимого запаса воды под килем Δd и высоты локального поднятия дна $h = H_0 - H_{\min}$, где H_0 — фоновая глубина; $H_{\min}$ — минимальная глубина над поднятием дна.

К опасным для судна с осадкой d относятся поднятия дна, для которых выполняется неравенство

$$\left(H_{\min} - d - \Delta d\right) \leq 0 \tag{13}$$

или

$$\left(H_0 - h - d - \Delta d\right) \leq 0. \tag{14}$$

Для малых поднятий дна численное значение параметров $H_{\min}$ и h, входящих в выражения (13) и (14), в общем случае неизвестно. Для их определения могут быть использованы методы, основанные на исследовании статистических свойств элементов подводного рельефа мелководных акваторий.

Обсуждение

Пропущенные опасные поднятия дна могут служить источником происшествий, связанных с посадкой судов на мель и касанием грунта в условиях мелководья. На арктическом шельфе в наиболее важных в навигационном отношении районах, к которым относятся рекомендованные пути, акватории портов и подходы к ним, для снижения риска посадки на неизвестные мели применяется площадное обследование с применением многолучевых эхолотов. Такая съёмка обеспечивает выявление навигационных опасностей с горизонтальными размерами от 1 м [21]. Предложенную методику выявления пропущенных опасных поднятий дна целесообразно использовать при планировании съёмки, когда необходимо выделить районы, в которых вероятность наличия пропущенных опасностей наиболее высока.

Основным источником информации о рельефе дна служат НМК, на которых главным образом отображаются крупные формы подводного рельефа, а малые формы подробно не отображаются. При решении задач, связанных с посадкой судов на мель, малые формы рельефа, как правило, не рассматриваются. В условиях мелководья, при минимальном запасе воды под килем, малые

формы рельефа могут являться основным источником посадок на мель и касания грунта. Практическое значение учета малых форм возрастает по мере увеличения осадок судов, работающих на мелководье арктического шельфа (например, на акватории Обской Губы). Формирование подходов к решению этой задачи является новым и нуждается в дальнейшем теоретическом и экспериментальном развитии. На сегодняшний день отсутствует статистическая информация о морфологических и морфометрических характеристиках малых форм рельефа, что служит основным ограничением, которое накладывается на достоверность полученных решений.

Заключение

На основании изложенного можно сделать следующие выводы:

1. Малые формы рельефа дна необходимо учитывать при оценке навигационной безопасности акватории.

2. При решении задачи оценки влияния локальных поднятий дна на безопасность судоходства следует учитывать особенности отображения подводного рельефа на НМК.

3. Для получения более надёжных результатов желательно использовать исходную гидрографическую информацию или информацию, содержащуюся на картах наиболее крупного масштаба.

Основные направления дальнейших исследований будут ориентированы на решение следующих задач:

– экспериментальная проверка полученных формул;

– статистическая обработка исходных гидрографических данных для получения достоверных морфологических и морфометрических характеристиках малых форм рельефа;

– разработка математической модели влияния локальных поднятий дна на аварийность судов, связанную с посадками на мель и касаниями грунта;

– разработка методических рекомендаций по гидрографическому обследованию мелководий и формированию зон безопасного судоходства в арктических морях.

Особую благодарность выражаем нашему учителю, профессору Игорю Александровичу Блинову, которого нет с нами уже пятнадцать лет, но научная жизнь которого продолжается в трудах его учеников.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Абрамов А. М.* Проблемы сравнения картографических отображений одного и того же подводного рельефа/ А. М. Абрамов // Навигация и гидрография. — 2013. — № 36. — С. 54–61.

2. *Луговой С. П.* Аварии морских судов и их предупреждения / С. П. Луговой. — М.: Водный транспорт, 1939. — 41 с.

3. *Чернышев А. А.* Погибли без боя. Катастрофы русских кораблей XVIII – XX вв. / А. А. Чернышев. — М.: Вече, 2012. — 400 с.

4. *Кацман Ф. М.* Аварийность морского флота и проблемы безопасности судоходства / Ф. М. Кацман, А. А. Ершов // Транспорт Российской Федерации. — 2006. — № 5 (5). — С. 82–84.

5. *Лушников Е. М.* Навигационная безопасность мореплавания / Е. М. Лушников. —Калининград: БГАРФ, 2007. — 261 с.

6. *Бродский П. Г.* Современные подходы к решению проблем обеспечения безопасности плавания судов и кораблей в Арктике / П. Г. Бродский, Ю. В. Румянцев, А. Н. Лукин // Навигация и гидрография. — 2016. — № 42. — С. 12–19.

7. *Михальский В. А.* Оценка навигационной безопасности плавания вблизи точечных опасностей / В. А. Михальский, М. В. Тюлькин // Навигация и гидрография. — 2006. — № 23. — С. 17–26.

8. *Логиновский В. А.* Моделирование оценки вероятности посадки судна на грунт с помощью нечетких чисел / В. А. Логиновский, А. А. Струков // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2013. — № 1 (20). — С. 89–96.

9. *Бураковский Е. П.* К вопросу об оценке рисков посадки судна на мель / Е. П. Бураковский, П. Е. Бураковский, В. А. Дмитровский // Известия КГТУ. — 2013. — № 29. — С. 159–164.

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

11. *Амельченко С. Г.* Применение вероятностных методов в оценке свойств подводного рельефа / С. Г. Амельченко, А. Л. Тезиков // Эксплуатация морского транспорта. — 2007. — № 4. — С. 30–31.

12. *Решетняк С.* В. Метод численной оценки параметров локальных поднятий поверхности морского дна при выполнении морского промера / С. В. Решетняк, А. Л. Тезиков, В. Ю. Бахмутов // Навигация и гидрография. — 2006. — № 23. — С. 116–119.

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

14. *Клюев В. В.* Использование теории геометрических вероятностей для оценки показателя стеснённости акватории Северного морского пути / В. В. Клюев // Навигация и гидрография. — 2016. — № 46. — С. 20–28.

15. *Клюев В. В.* Количественная оценка показателя стесненности акватории Северного морского пути / В. В. Клюев // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2016. — № 5 (39). — С. 109–117. DOI: 10.21821/2309-5180-2016-8-5-109-117.

16. *Биккенин Р. Р.* Теория электрической связи / Р. Р. Биккенин, М. Н. Чесноков. — М.: Академия, 2010. — 329 с.

17. Правила гидрографической службы №4 (ПГС-4). — СПб.: ГУНиО, 1983. — Ч. 2. — 264 с.

18. Правила гидрографической службы № 5. Составление и издание морских карт (ПГС-5). — СПб.: УНиО, 2009. — Ч. 1. — 319 с.

19. Основы отображения подводного рельефа на морских картах. — Л.: ГУНиО, 1973. — 186 с.

20. Снопков В. И. Управление судном / В. И. Снопков. — СПб.: АНО НПО «Профессионал», 2004. — 536 с.

21. IHO Standards for Hydrographic Surveys. — 5th Edition. — February 2008. — Special Publication № 44. — International Hydrographic Bureau, Monaco. — 27 p.

REFERENCES

1. Abramov, A.M. “Problemy sravneniya kartograficheskikh otobrazhenii odnogo i togo zhe podvodnogo rel’efa.” *Navigatsiya i gidrografiya* 36 (2013): 54–61.

2. Lugovoi, S. P. *Avarii morskikh sudov i ikh preduprezhdeniya*. M.: Vodnyi transport, 1939.

3. Chernyshev, A. A. *Pogibli bez boya. Katastrofy russkikh korablei XVIII – XX vv.* M.: Veche, 2012.

4. Katsman, F. M., and A. A. Ershov. “Avariinost’ morskogo flota i problemy bezopasnosti sudokhodstva.” *Transport Rossiiskoi Federatsii* 5(5) (2006): 82–84.

5. Lushnikov, E. M. *Navigatsionnaya bezopasnost’ moreplavaniya*. Kaliningrad: BGARF, 2007.

6. Brodskii, P. G., Yu. V. Rumyantsev, and A. N. Lukin. “Sovremennye podkhody k resheniyu problem obespecheniya bezopasnosti plavaniya sudov i korablei v Arktike.” *Navigatsiya i gidrografiya* 42 (2016): 12–19.

7. Mikhal’skii, V. A., and M. V. Tyul’kin. “Otsenka navigatsionnoi bezopasnosti plavaniya vblizi tochechnykh opasnostei.” *Navigatsiya i gidrografiya* 23 (2006): 17–26.

8. Loginovskij, V. A., and A. A. Strukov. “Modeling of the probability assessment of grounding the vessel by fuzzy numbers.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 1(20) (2013): 89–96.

9. Burakovskii, E. P., P. E. Burakovskii, and V. A. Dmitrovskii. “K voprosu ob otsenke riskov posadki sudna na mel’.” *Izvestiya KGTU* 29 (2013): 159–164.

10. Afonin, A. B, E. O. Ol’hovik, and A. L. Tezikov. “Development of the assessment methods of anadromous depths on the northern sea route depending on the detail of survey of the bottom relief.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 4(38) (2016): 62–68. DOI: 10.21821/2309-5180-2016-8-4-62-68.

11. Amelchenko, S. G., and A. L. Tezikov. "The Application of probabilistic methods in evaluation of the qualities of the underwater relief." *Ekspluatacia morskogo transporta* 4 (2007): 30–31.

12. Reshetnyak, S. V., A. L Tezikov, and V. Y. Bakhmutov. "Method of Numerical Evaluation of Parameters for the Local Sea Bottom Rises When Conducting the Sea Survey." *Navigation and Hydrography* 23 (2006): 116–119.

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

14. Klyuev, V. V. "Ispol'zovanie teorii geometricheskikh veroyatnostei dlya otsenki pokazatelya stesnennosti akvatorii Severnogo morskogo puti." *Navigatsiya i gidrografiya* 46 (2016): 20–28.

15. Kljuev, Vitaly Vladimirovich. "Quantitative assessment of constraint of the Northern sea route". *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova* 5(39) (2016): 109–117. DOI: 10.21821/2309-5180-2016-8-5-109-117.

16. Bikkenin, R. R., and M.N. Chesnokov. *Teoriya elektricheskoi svyazi*. M.: Akademiya, 2010.

17. *Pravila gidrograficheskoi sluzhby №4 (PGS-4)*. Part 2. SPb.: GUNiO, 1983.

18. *Pravila gidrograficheskoi sluzhby № 5. Sostavlenie i izdanie morskikh kart (PGS-5)*. Part 1. SPb.: UNiO, 2009.

19. *Osnovy otobrazheniya podvodnogo rel'efa na morskikh kartakh*. L.: GUNiO, 1973.

20. Snopkov, V. I. *Upravlenie sudnom*. SPb.: ANO NPO «Professional», 2004.

21. IHO Standards for Hydrographic Surveys. 5th Edition. Special Publication № 44. Monaco: International Hydrographic Bureau, 2008.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Афонин Андрей Борисович —
кандидат технических наук, доцент
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова»
198035, Российская Федерация, Санкт-Петербург, ул. Двинская, 5/7
e-mail: *andrey.afonin.gma@yandex.ru, kaf_gm@gumrf.ru*

Королев Иван Юрьевич — аспирант
Научный руководитель:
Тезиков Александр Львович
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова»
198035, Российская Федерация, Санкт-Петербург, ул. Двинская, 5/7
e-mail: *i.korolev@fertoing.ru*

Тезиков Александр Львович —
доктор технических наук, профессор
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова»
198035, Российская Федерация, Санкт-Петербург, ул. Двинская, 5/7
e-mail: *altezikov@yandex.ru, TezikovAL@gumrf.ru*

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Afonin, Andrej B. —
PhD, associate professor
Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping
5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg, 198035, Russian Federation
e-mail: *andrey.afonin.gma@yandex.ru, kaf_gm@gumrf.ru*

Korolev, Ivan Ju. — postgraduate
Supervisor:
Tezikov, Aleksandr L.
Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping
5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg, 198035, Russian Federation
e-mail: *i.korolev@fertoing.ru*

Tezikov, Aleksandr L. —
Dr. of Technical Sciences, professor
Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping
5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg, 198035, Russian Federation
e-mail: *altezikov@yandex.ru, TezikovAL@gumrf.ru*

Статья поступила в редакцию 17 июня 2017 г.
Received: June 17, 2017.

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

DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-4-744-751

INTRODUCTION OF AUTOMATED HYDROGRAPHIC SWEEPING SYSTEMS FOR NAVIGATION SAFETY ON INLAND WATERWAYS RUSSIAN FEDERATION

V. V. Karetnikov, A. I. Zaitsev, E. A. Ratner

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

Using inland waterway transport is economically justified in any region of the world, however to this day inland waterway freight and passenger transportation in Russian Federation constitutes not a big fraction of the total amount of traffic even as the total length of navigational waterways in Russia is more than one hundred thousand kilometers and the length of today valid navigational waterways is more than seventy thousand kilometers. There are two major reasons for this situation. The first one is a lack of quality up-to-date nautical electronical charts covering navigable sections of inland waterways. Providing the region with valid electronical cartographic resources over a short period of time is possible only by introducing innovative technologies. The second one is navigational and hydrographic support quality. In order to resolve both issues simultaneously, authors suggest using automated hydrographic sweeping systems, allowing for prompt conduction of inland surveys, dragging and sweeping at rather low operating costs. Additionally, it will provide an opportunity for partial automation of the chart manufacturing process like automated hydrographic survey systems do, which in turn will lead to a wider use of the region's inland waterways by cargo and passenger vessels in the future. This paper describes issues that can be solved by means of automated hydrographic sweeping systems, equipment used by the systems, and basic algorithms for calculating and correcting measured parameter values (level, antenna lowering, calibration, vessel subsidence in shallow waters, distance between the satellite navigation system and the echo sounder antennae), as well as techniques for the evaluation of the accuracy of depth values received by an echo sounder.

Keywords: automated hydrographic sweeping system, sweeping, dragging, hydrographic survey; e-Navigation, electronic navigational chart; safety of navigation; inland waterways; accuracy of depths values; global positioning system: echo sounder, sonar.

For citation:
Karetnikov, Vladimir V., Elizaveta A. Ratner, and Aleksei I. Zaitsev. "Introduction of automated hydrographic sweeping systems for navigation safety on inland waterways Russian Federation." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 9.4 (2017): 744–751. DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-4-744-751.

УДК: 528.088

ВНЕДРЕНИЕ АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ ТРАЛЬНЫХ КОМПЛЕКСОВ ДЛЯ ОБЕСПЕЧЕНИЯ БЕЗОПАСНОСТИ НАВИГАЦИИ НА ВНУТРЕННИХ ВОДНЫХ ПУТЯХ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

В. В. Каретников, А. И. Зайцев, Е. А. Ратнер

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

Использование внутреннего водного транспорта экономически оправдано в любом регионе мира, но на сегодняшний день грузовые и пассажирские перевозки по внутренним водным путям (ВВП) Российской Федерации составляют небольшую долю от общего числа перевозок несмотря на то, что их протяженность в РФ составляет более 100 тыс. км, из которых сегодня используются более 70 тыс. км. К возникновению этой ситуации, по всей видимости, привели две основных причины. Первой причиной является недостаток качественного актуального покрытия электронными навигационными картами судоходных участков ВВП. Обеспечить регион оперативной актуальной электронной картографической информацией можно только с помощью внедрения новых технологий. Второй причиной является качество навигационно-гидрографического обеспечения на участках ВВП РФ. Для одновременного решения обеих этих задач

авторы предлагают использовать автоматизированные тральные комплексы, позволяющие оперативно проводить русловые изыскания с достаточно низкими эксплуатационными расходами. В данной статье рассмотрены задачи, решаемые посредствам автоматизированных тральных комплексов, указан состав входящего в комплекс оборудования, а также представлены основные алгоритмы расчета и введения поправок в значения измеряемых параметров (поправки за уровень, за углубление антенны, за тарирование, за проседание судна при движении на мелководье, за отстояние антенны приемника спутниковой навигационной системы от антенны эхолота) и методика оценки достоверности значений глубин, поступивших от эхолота.

Ключевые слова: автоматизированный тральный комплекс, траление, гидрографическое исследование, промерные работы, е-Навигация, электронная навигационная карта, безопасность судоходства, внутренние водные пути, точность измерения глубин, спутниковая навигационная система, эхолот, гидролокатор бокового обзора.

Для цитирования:
Каретников В. В. Внедрение автоматизированных тральных комплексов для обеспечения безопасности навигации на внутренних водных путях Российской Федерации / В. В. Каретников, А. И. Зайцев, Е. А. Ратнер // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2017. — Т. 9. — № 4. — С. 744–751. DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-4-744-751.

Введение

На сегодняшний день актуальность и экономическая целесообразность использования внутренних водных путей (ВВП) ни у кого не вызывают сомнения. Более 40 тыс. км судоходных участков ВВП РФ используются на протяжении всего навигационного периода, еще около 40 тыс. км судоходны и используются по запросу. Более 56 тыс. км судоходных участков, включая 90 % всех участков ВВП с установленными гарантированными габаритами судовых ходов (СХ), покрыты созданными в период с 2007 по 2016 гг. электронными навигационными картами (ЭНК). Поддержание высокого уровня безопасности судоходства, связанное, в частности, со сложными климатическими и гидрологическими условиями на реках, требует отлаженной работы всей системы навигационно-гидрографического обеспечения плавания, особенно в части постоянного систематического изучения руслового режима рек, траления, проектирования, выполнения дноуглубительных работ и т. д., т. е. условий, которых, в свою очередь, невозможно достичь без использования современных автоматизированных производственных комплексов, предназначенных для проведения путевых работ.

С целью обеспечения безопасности судоходства на ВВП РФ в составе производства путевых работ проводится сплошное, местное и аварийное траление. Применяемые методы и способы проведения траления обеспечивают выявление подводных препятствий и контроль над установленными гарантированными габаритами СХ, но являются весьма затратными по времени производства работ и требуют затратного применения ручного труда. К тому же применяемые сегодня методы и способы траления не позволяют картографически документировать результаты выполненных работ. Кроме того, производимое сегодня сплошное, местное и аварийное траление не гарантирует обеспечения чистоты исследуемого района и не позволяет постоянно вести документированные учетные записи прохождения трала [1] – [4].

На сегодняшний день необходимо внедрять на ВВП новые инструментальные методы траления, гарантирующие чистоту СХ. Одним из комплексов, позволяющих решать такие задачи, является автоматизированный тральный комплекс (АТК), предназначенный для проверки чистоты СХ и формирования массивов батиметрических данных для последующего их использования, в том числе для создания ЭНК [5] – [7]. Методы работы с АТК были подробно рассмотрены в статье А. А. Сикарева, В. В. Каретникова, И. Г. Кузнецова и Р. В. Волкова «Особенности проведения путевых работ перспективными автоматизированными тральными комплексами на внутренних водных путях Российской Федерации», опубликованной в в журнале «Морская радиоэлектроника» (№ 4, 2013 г.). В данной статье описываются методы контроля качества измерений глубин с помощью АТК, а также методы вычисления поправок в измеренные глубины.

Методы и материалы

Современный инструментальный метод проведения путевых работ с помощью АТК позволит обеспечить выявление подводных препятствий и контроль над установленными габаритами СХ с низкими расходами и трудозатратами, картографически документировать прохождение «трала» и гарантировать чистоту исследуемого района с высокой вероятностью [8], [9]. Помимо этого, достоверные и точные исходные данные, полученные АТК, можно использовать в картографических отделах и службах для оперативного обновления ЭНК. АТК предназначен для автоматизации и повышения качества производства тральных работ. Данный комплекс решит задачи выявления и определения местоположения подводных препятствий и объектов. В качестве батиметрического датчика в АТК может применяться достаточно широкий спектр гидроакустических устройств:

– эхолот с широкой диаграммой направленности;
– гидролокатор бокового обзора;
– многолучевой эхолот;
– многолучевой эхолот с двумя датчиками.

Для производства тральных работ с использованием перспективных АТК на ВВП весьма целесообразным считается использование интерферометрического гидролокатора бокового обзора (ГБО) с диаграммой направленности 240 град. [9], [10]. Основным результатом съёмки ГБО является акустическое изображение толщи воды и дна, которое может быть привязано или не привязано к местности. Полоса траления перспективных тральных комплексов на базе интерферометрических систем зависит от фактической глубины до дна. Для примерной оценки ширины протраливаемой полосы в зависимости от глубины составлена вспомогательная таблица [11] – [13].

Значения ширин протраливаемой полосы в зависимости от глубины

Глубина под излучателем, м	Полоса обзора (батиметрии и ГБО), м
2	14
3	21
4	28
5	35
6	42
7	49
8	56
10	70
15	105

Применение в качестве батиметрического датчика АТК многолучевого эхолота, несмотря на высокую стоимость данного вида оборудования, позволяет получать высококачественные промерные данные. Таким образом, при использовании многолучевого эхолота параллельно можно решать задачу траления и задачу промера [14], [15]. При производстве тральных работ с использованием АТК также целесообразным может считаться использование одного или двух эхолотов с широкой диаграммой направленности.

Выбор варианта оснащения АТК конкретным видом батиметрического датчика зависит от решаемых задач и топологии участка пути, на котором планируется проводить тральные работы [1], [3], [15].

При работе с АТК, имеющим в составе эхолот, в целях контроля качества анализируется достоверность значений глубин, поступивших от эхолота. В начальной стадии анализа глубин оператор выбирает и вводит в программу первое значение глубины в выборке данных, являющееся, безусловно, достоверным, далее каждое значение глубины, за исключением первого значения Z_1,

проверяется на наличие грубого промаха в измерении. Измеренное значение глубины Z_i классифицируется как промах, если её превышение ΔZ_i относительно предыдущего измерения $Z_{(i-1)}$ окажется больше допустимой величины $\Delta Z_{\text{доп}}$, т. е. если

$$\left|Z_i - Z_{i-1}\right| > \Delta Z_{\text{доп}}. \quad (1)$$

Величина $\Delta Z_{\text{доп}}$ вычисляется программно, исходя из максимально возможного градиента глубины в районе и фактически пройденного судном расстояния между измеренными глубинами $Z_{(i-1)}$ и Z_i. Максимально возможное в районе значение угла наклона дна вводится оператором. Значение глубины Z_i, классифицированное как промах, снабжается соответствующим признаком и регистрируется на техническом носителе информации (ТНИ). В дальнейшей обработке измеренных значений глубин это значение не используется.

Второй стадией оценки достоверности глубин является формирование исходной выборки из $n - 1$ значений, принятых от эхолота и прошедших грубую фильтрацию глубин (где n задается операторам в зависимости от условий съемки и характера рельефа дна в районе). Программа, приняв $n - 1$ подряд измеренных значений глубин, оценивает однородность этой выборки. С этой целью вычисляются градиенты изменения глубины между каждыми двумя смежными измерениями. Из них выбирается максимальный градиент, и проверяется вероятность его появления в одном ряду с остальными. Если эта вероятность оказывается выше 0,1, то принимается, что значение глубины, вызвавшее этот градиент, достоверно. А поскольку проверенный градиент является максимальным в выборке, то и все остальные значения глубин являются достоверными. Таким образом, процесс формирования исходной выборки завершается. Если же вероятность появления выбранного максимального градиента в выборке оказывается меньше 0,1, то значение глубины, вызвавшее этот градиент, из выборки исключается, сопровождается признаком недостоверности и регистрируется на ТНИ. Выборка пополняется вновь измеренным значением глубины.

Сформированная выборка из $n - 1$ достоверных значений глубин служит базисом для оценки достоверности очередного n-го значения глубины третьей ступенью. Принцип работы третьей ступени фильтра аналогичен описанному, за исключением того, что дополнительно оценивается вероятность появления величины градиента, вычисленного на отрезке между измерениями $(n - 1)$-го и n-го значений глубин. Если по результатам этой проверки окажется, что значение глубины Z_n недостоверно, то программа организует дополнительную проверку, целью которой является выяснение возможности того, что существенное различие в величине градиентов обусловлено фактически резким изломом профиля дна. При подтверждении этого предположения значение глубины Z_n признается достоверным. В противном случае этому значению придается признак недостоверной глубины, с которым оно и регистрируется на ТНИ.

АТК контролирует непрерывность регистрации глубин (в зависимости от условий съемки и сложности рельефа дна пропуски в регистрации могут быть различной интенсивности и длительности), обнаруживает и фиксирует пропуски, которые являются значимыми для качества создаваемой в результате съемки цифровой модели рельефа дна. С этой целью вычисляется допустимый интервал пропуска глубин на галсе $\Delta S_{\text{доп}}$, который еще не приводит к существенному ухудшению качества съемки. Допустимая величина интервала рассчитывается по формуле

$$\Delta S_{\text{доп}} = 1,764 \frac{m_z}{m_{\text{д}}}, \quad (2)$$

где $m_{\text{д}}$ — среднее квадратическое отклонение тангенсов углов наклона дна от среднего значения, вычисленное по значениям измеренных глубин по галсу до пропуска и после пропуска; m_z — средняя квадратическая погрешность регистрируемых глубин, обусловленная погрешностями измерения и исправления глубин поправками и привязки глубин к координатам.

Еще одним элементом контроля качества выполнения промерных работ является оценка допустимого расхождения глубин в точках пересечения основного и контрольных галсов $\Delta Z_{\text{доп}}$, причем количество точек пересечения основного и контрольных галсов должно быть не менее 50.

$$\Delta Z_{\text{доп}} = \left|\Delta \overline{Z}_{\text{сл}}\right| + K\delta_{\text{сл}}, \quad (3)$$

где $\Delta \overline{Z}_{\text{сл}}$ — среднее значение абсолютных расхождений глубин в точках пересечения галсов; $\delta_{\text{сл}}$ — среднее квадратическое отклонение расхождений от среднего; K — коэффициент.

Коэффициент K вычисляется программой таким образом, что с вероятностью 0,95 не менее 85 % расхождений глубин в точках пересечения основных и контрольных галсов не выйдут за пределы $\pm\Delta Z_{\text{доп}}$. Такая методика обеспечивает возможность получения оценки $\Delta Z_{\text{доп}}$, объективно характеризующей тот предел совпадения глубин в точках пересечения галсов, который достижим именно при данных условиях съемки, типе рельефа дна в районе, точности измерения глубин и определении места судна на галсах. Значения расхождений, превышающие допуск $\pm\Delta Z_{\text{доп}}$, предъявляются оператору для анализа и принятия решения о правомерности появления каждого такого значения.

Комплекс, имеющий в составе эхолот, обеспечивает вычисление поправок к измеренным глубинам и исправление глубин:

– поправка за углубление антенны вычисляется по данным непосредственных измерений осадки судна и может вводиться в эхолот или в ЭВМ-комплекс;

– исправления глубин поправками за тарирование (исправляются только глубины меньше 30 м) вычисляется по данным двух последовательных тарирований;

– вводятся поправки за проседание судна при движении на мелководье и за отстояние антенны СНС от антенны эхолота;

– поправка за наклон дна вводится при съемке на резко расчлененном рельефе дна (если это предусмотрено заданием), при этом она вычисляется по всему массиву значений глубин и сразу вводится в каждое значение глубины, вычисление углов наклона дна производится по значениям глубин, прошедшим проверку на достоверность;

– все измеренные глубины приводятся к принятому нулю глубин путем введения поправки за уровень.

Результаты

Расчет поправки за углубление антенны $\Delta Z_{\text{в}}$ (в случае использования выносного забортного устройства измеряется расстояние по вертикали от верхней плоскости обтекателя до поверхности воды):

– $\Delta Z_{\text{в}} = H - h$ — для врезного вибратора;

– $\Delta Z_{\text{в}} = H_{\text{о}} + h_{\text{о}}$ — для выносного вибратора, где H — осадка судна;

– $H_{\text{о}}$ — заглубление выносного забортного устройства;

– h — превышение излучающей поверхности врезного вибратора над килем судна;

– $h_{\text{о}}$ — толщина обтекателя выносного вибратора от внешней плоскости до излучающей поверхности.

Величины H, $H_{\text{о}}$, h, $h_{\text{о}}$ измеряются с точностью до 0,01 м.

Исправление глубин поправками за тарирование вычисляется по формуле

$$\Delta Z_i = \Delta Z_{jT1} + K_1\left(\Delta Z_{jm1} - \Delta Z_{(j-1)m1}\right) + K_2\left(1 + K_1\right)\left(\Delta Z_{jm2} - \Delta Z_{jm1}\right) - K_1K_2\left(\Delta Z_{(j-1)m2} - \Delta Z_{(j-1)m1}\right), \quad (4)$$

где $K_1 = \left(Z_j - Z_i\right) / \left(Z_j - Z_{(j-1)}\right)$; $K_2 = \left(t_{zi} - T_1\right) / \left(T_2 - T_1\right)$; Z_j — глубина j-го горизонта тарирования; Z_i — измеренная глубина, для которой рассчитывается поправка ΔZ_i, причем $Z_j - 1 < Z_i < Z_j$; T_1 и T_2 — время проведения 1- и 2-го последовательных тарирований эхолота; t_{zi} — время измерения глубины Z_i, причем $T_1 < t_{zi} < T_2$; ΔZ_{jT1} и ΔZ_{jT2} — поправки к показаниям эхолота, полученные на j-м горизонте при 1- и 2-м тарированиях эхолота.

Вычисление поправки за проседание судна при движении на мелководье производится по следующим формулам:

$$\Delta Z_{\text{пр}} = \overline{Z}_{\text{н}} - \overline{Z}_{\text{д}}; \quad (5)$$

$$\overline{Z}_{\text{н}} = \sum_{j-1}^{n} \frac{z_n}{n}; \tag{6}$$

$$\overline{Z}_{\text{д}} = \sum_{j-1}^{n} \frac{z_{\text{д}}}{n}, \tag{7}$$

где $\overline{Z}_{\text{н}}$ — глубина, измеренная эхолотом с неподвижного судна; $\overline{Z}_{\text{д}}$ — глубина, измеренная эхолотом с движущегося судна.

Вычисление поправки за отстояние антенны СНС от антенны эхолота выполняется по формулам:

$$\Delta X_i = l \cos (T + q); \tag{8}$$

$$\Delta Y_i = l \sin(T + q), \tag{9}$$

где l — расстояние между центром приема антенны СНС и антенной эхолота; T — дирекционное направление галса; q — курсовой угол с центром приема антенны СНС на антенну эхолота (курсовой угол правого борта имеет знак «плюс», левого — «минус»).

Формула для вычисления поправки за наклон дна имеет следующий вид:

$$\Delta Z_{\alpha} = \begin{cases} Z\left[\cos(\alpha - \gamma)\sec\alpha - 1\right], \text{ при } \alpha > \gamma; \\ Z(\sec\alpha - 1)\alpha > \gamma, \text{ при } \alpha \le \gamma, \end{cases} \tag{10}$$

где α — угол наклона дна; γ — половина угла диаграммы направленности излучения эхолота в диаметральной плоскости судна.

Приведение результатов съемки к принятому нулю глубин осуществляется путем введения поправок за уровень, полученный по результатам наблюдений колебания уровня воды на уровенных постах:

$$\Delta Z = n - f, \tag{11}$$

где n — отсчет по рейке ближайшего уровенного поста; f — отсчет по той же рейке мгновенного уровня в момент измерения глубины.

В районах съемки, где зоны действия уровенных постов взаимно перекрываются, поправки за уровень вычисляются для каждого отдельного участка съемки по своему посту. На момент времени t измерения глубины Z в таблице данных уровенного поста отыскивается отсчет уровня f путем линейной интерполяции в интервале $t_i < t < t_{i+1}$, а затем вычисляется поправка ΔZ.

Заключение

Выполнение тральных работ на участках ВВП посредствам АТК позволит картографически документировать результаты проведения тральных работ в автоматизированном режиме, гарантировать обеспечение чистоты протраленного участка с высокой вероятностью, вести постоянное документирование учетных записей, фиксирующих прохождения трала; оптимизировать затраты на проведение тральных работ. Проведение тральных работ с применением ЭНК и современных гидроакустических средств позволит повысить качество производимых путевых работ и, следовательно, безопасность судоходства на ВВП РФ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Сикарев А. А.* Особенности проведения путевых работ перспективными автоматизированными тральными комплексами на внутренних водных путях Российской Федерации / А. А. Сикарев, В. В. Каретников, И. Г. Кузнецов, Р. В. Волков // Морская радиоэлектроника. — 2013. — № 4 (46). — С. 34–37.

2. *Weintrit A.* Geoinformatics in Hydrography and Marine Navigation / A. Weintrit // Geoinformatics for Marine and Coastal Management. — CRC Press, 2016. — Pp. 323–348.

3. *Баглюк Ю. В.* Применение автоматизированного промерного комплекса для создания и корректуры электронных навигационных карт внутренних водных путей / Ю. В. Баглюк, И. А. Башмаров, В. В. Секачев, А. Н. Ратнер // Морской вестник. — 2008. — № 1. — С. 62–64.

4. *Каретников В. В.* Перспективы комплексирования речных инфокоммуникационных технологий для повышения безопасности судоходства на внутренних водных путях / В. В. Каретников, В. А. Бекряшев // Речной транспорт (XXI век). — 2014. — № 2 (67). — С. 49–53.

5. *Каретников В. В.* Опыт применения современных инфокоммуникационных технологий для повышения точности речных электронных навигационных карт / В. В. Каретников, Д. Ф. Миляков, С. В. Рудых // Речной транспорт (XXI век). — 2015. — № 5 (76). — С. 35–37.

6. *Каретников В. В.* Использование современных телекоммуникационных средств для навигационно-гидрографического обеспечения судоходства на внутренних водных путях России / В. В. Каретников, С. В. Рудых, М. А. Петров // Морская радиоэлектроника. — 2016. — № 3(57). — С. 12–15.

7. *Чистяков Г. Б.* Использование современных аппаратно-программных комплексов для проведения путевых работ на внутренних водных путях / Г. Б. Чистяков // Морская радиоэлектроника. — 2012. — № 2. — С. 20–23.

8. *Рудых С. В.* Использование глобальных навигационных спутниковых системв автоматизированных системах контроля землечерпательных работ / С. В. Рудых // Морская радиоэлектроника. — 2012. — № 4. — С. 38–41.

9. *Каретников В. В.* К вопросу использования интерферометрического гидролокатора бокового обзора при производстве путевых работ на внутренних водных путях РФ / В. В. Каретников, В. А. Бекряшев, Р. Ф. Волков // Евразийский союз ученых. — 2015. — № 2–2 (11). — С. 106–107.

10. Производство тральных работ. [Электронный ресурс]. — Режим доступа: http://svaika.ru/proizvodstvo-tralnich-rabot (дата обращения: 10.07.2017).

11. Заседание Совета руководителей администраций бассейнов внутренних водных путей [Электронный ресурс]. — Режим доступа: http://www.morflot.ru/lenta/n3094.html (дата обращения: 13.07.2017).

12. ЗАО «Мариметр» — поставщик навигационного оборудования. [Электронный ресурс]. — Режим доступа: http://www.marimeter.ru/ (дата обращения: 09.07.2017).

13. *Гладков Г. Л.* Обеспечение условий судоходства на внутренних водных путях / Г. Л. Гладков // Транспорт Российской Федерации. Журнал о науке, практике, экономике. — 2014. — Тематическое приложение № 1. — С. 8–14.

14. *Костарев С. А.* Камский бассейн: Камводпуть: из прошлого в будущее. [Электронный ресурс] / С. А. Костарев. — Режим доступа: http://morvesti.ru/analitics/detail.php?ID=26561 (дата обращения 09.07.2017).

15. *Нестеров Н. А.* Некоторые аспекты навигационно-гидрографического обеспечения дноуглубительных работ / Н. А. Нестеров, В. Н. Проворов, Н. Г. Пономаренко // Геодезия и картография. — 2008. — № 8. — С. 40–46.

REFERENCES

1. Sikarev, A. A., V. V. Karetnikov, I. G. Kuznetsov, and R. V. Volkov. “Features of track work perspective automated trawling complex on inland waterways of the Russian Federation.” *Marine Radio-electronics* 4(46) (2013): 34–37.

2. Weintrit, Adam. “Geoinformatics in Hydrography and Marine Navigation.” *Geoinformatics for Marine and Coastal Management*. CRC Press, 2016: 323–348.

3. Baglyk, Y. V., I. A. Bashmarov, V. V. Sekachev, and A. N. Ratner. “Use of automated sounding system for the adjustment and correction of electronic navigation charts of inland waterways.” *Morskoy Vestnik* 1 (2008): 62–64.

4. Karetnikov, V. V., and V. A. Bekryashev. “Perspektivy kompleksirovaniya rechnykh infokommunikatsionnykh tekhnologii dlya povysheniya bezopasnosti sudokhodstva na vnutrennikh vodnykh putyakh.” *River transport (XXIst century)* 2(67) (2014): 49–53.

5. Karetnikov, V. V., D. F. Milyakov, and S. V. Rudykh. “Opyt primeneniya sovremennykh infokommunikatsionnykh tekhnologii dlya povysheniya tochnosti rechnykh elektronnykh navigatsionnykh kart.” *River transport (XXIst century)* 5(76) (2015): 35–37.

6. Karetnikov, V. V., S. V. Rudy’kh, and M. A. Petrov. “The use of modern telecommunication equipments for shipping condition on the inland waterways of the Russian Federation.” *Marine Radio-electronics* 3(57) (2016): 12–15.

7. Chistyakov, G. B. "Application of the advanced program production complexes for performing waterway works on the inland waterways." *Marine Radio-electronics* 2 (2012): 20–23.

8. Rudy'kh, S. V. "Use of global navigation satellite systems in automated control and positioning systems at dredging works." *Marine Radio-electronics* 4 (2012): 38–41.

9. Karetnikov, V. V., V. A. Bekryashev, and R. F. Volkov. "K voprosu ispol'zovaniya interferometricheskogo gidrolokatora bokovogo obzora pri proizvodstve putevykh rabot na vnutrennikh vodnykh putyakh RF." *Evraziiskii soyuz uchenykh* 2-2(11) (2015): 106–107.

10. Proizvodstvo tral'nykh rabot. Web 10 July 2017 <http://svaika.ru/proizvodstvo-tralnich-rabot>.

11. Zasedanie Soveta rukovoditelei administratsii basseinov vnutrennikh vodnykh putei. Web 13 July 2017 <http://www.morflot.ru/lenta/n3094.html>.

12. ZAO «Marimetr» - postavshchik navigatsionnogo oborudovaniya. Web 9 July 2017 <http://www.marimeter.ru/>

13. Gladkov, G. L. "Obespechenie uslovii sudokhodstva na vnutrennikh vodnykh putyakh." *Transport Rossiiskoi Federatsii. Zhurnal o nauke, praktike, ekonomike* Tematicheskoe prilozhenie 1 (2014): 8–14.

14. Kostarev, S. A. "Kamskii bassein: Kamvodput': Iz proshlogo v budushchee." Web 9 July 2017 <http://morvesti.ru/analitics/detail.php?ID=26561>.

15. Nesterov, N. A., V. N. Provorov, and N. G. Ponomarenko. "Several aspects of navigation-hydrographical providing of dredging works." *Geodesy and Cartography* 8 (2008): 40–46.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Каретников Владимир Владимирович —
доктор технических наук, профессор
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

Ратнер Елизавета Александровна — аспирант
Научный руководитель:
Зайцев Алексей Иванович
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала
С. О. Макарова»
198035, Российская Федерация, Санкт-Петербург,
ул. Двинская, 5/7
e-mail: *elizaveta.a.ratner@gmail.com*,
kaf_svvp@gumrf.ru

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

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Karetnikov, 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: *spguwc-karetnikov@yandex.ru*,
kaf_svvp@gumrf.ru

Ratner, Elizaveta A. — Postgraduate
Supervisor:
Zaitsev, Aleksei I.
Admiral Makarov State University of Maritime
and Inland Shipping
5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg, 198035,
Russian Federation
e-mail: *elizaveta.a.ratner@gmail.com*,
kaf_svvp@gumrf.ru

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

Статья поступила в редакцию 15 июля 2017 г.
Received: July 15, 2017.

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

СУДОСТРОЕНИЕ И СУДОРЕМОНТ

DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-4-752-764

POPPERATIONAL CHANGE OF SURFACE LAYER QUALITY OF STEEL PARTS AFTER DIFFERENT MECHANICAL PROCESSING METHODS

A. M. Gafarov, Ch. M. Aliyev, A. M. Guliyev

Azerbaijan State Marine Academy, Baku, Azerbaijan Republic

The article is devoted to the actual problem for the machine building: the development of new improvements to existing technological methods of processing, which significantly increases the wear resistance of surfaces of precision parts of machines and equipment. Information on the quality of surfaces precision parts is not always distinguished by the originality of technological solutions in the available technical literature. We mainly consider the technological capabilities of individual traditional finishing methods, which are not always provided the required wear-resistance characteristics of the machine parts and equipment surface layers. The purpose of the study is to improve the precision parts surfaces quality of machines and equipment by creating new and improving existing methods of processing and determining technological capabilities, the processes examined, taking into account the rational combination of successive operations. The rotational boring process has been improved to solve this problem. Original methods of machining have been developed, such as grinding with vibration damping, rotational honing, dosed lapping, elastic rolling, etc.

The recommended technological processing methods of machines high-precision parts are progressive, both in the accuracy and quality ensuring of the surface and productivity. Rotational boring was carried out with the use of a special rotary boring head on the mod.1K62 machine. When grinding with vibro-damping is used mod.3B227 machine equipped with a special vibro-grinding head. Rotational honing is performed on the mod.3M82S machine, on which the rotary honing head is mounted, the dosed lapping is performed on the mod.2H135 and 1K62 machines equipped with special lapping heads, the elastic rolling is performed on the mod.1A730 machines, using a special designed elastic rolling head. As the processed material, Steels of grade 38ХМЮА, 30Х13, 40Х and 45 are used.

Rational parameters of the examined technological operations are determined, based on the results of experimental studies, ensuring optimal parameters for the surface quality of parts. The values of the operational change in the surface quality indices (roughness, residual stress, micro hardness) are determined with the selected combination of recommended technological operations. The developed and improved methods have been successfully used in processing high-precision parts of machines in laboratory conditions and are recommended for introduction into production.

Keywords: technological processes, detail, roughness, residual stress, micro hardness, surface layer, operational change, wear, reliability, machinery, equipment.

For citation:

Gafarov, Aydin M., Chingiz M. Aliyev, and Alimardan M. Guliyev. "Popperational change of surface layer quality of steel parts after different mechanical processing methods." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 9.4 (2017): 752–764. DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-4-752-764.

УДК.621-192; 621.81-192

ИССЛЕДОВАНИЕ ПООПЕРАЦИОННОГО ИЗМЕНЕНИЯ КАЧЕСТВА ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ ВЫСОКОТОЧНЫХ ДЕТАЛЕЙ СУДОВЫХ МАШИН И МЕХАНИЗМОВ, ОБРАБОТАННЫХ РАЗЛИЧНЫМИ МЕТОДАМИ

А. М. Гафаров, Ч. М. Алиев, А. М. Кулиев

Азербайджанская Государственная Морская Академия,
Баку, Азербайджанская Республика

Статья посвящена актуальной для машиностроения задаче: разработке новых и усовершенствованию существующих технологических способов обработки, существенно повышающих точность и качество поверхности, а также износостойкость поверхностных слоев высокоточных деталей машин и оборудования. Имеющаяся в технической литературе информация о качестве поверхностей высокоточных деталей не всегда отличается комплексностью выявления основных показателей качества поверхностей и оригинальностью технологических решений. В основном рассматриваются технологические возможности отдельных традиционных методов финишной обработки по отдельным параметрам качества поверхности, которые не позволяют однозначно ответить на вопросы, связанные с влиянием этих показателей на износостойкостные характеристики поверхностных слоев деталей машин и оборудования. Для решения указанной проблемы усовершенствован процесс ротационного растачивания. Разработаны оригинальные способы механической обработки, такие как шлифование с виброгашением, ротационное хонингование, притирка с дозированным съемом материала, раскатывание с регулированием деформирующих усилий.

Рекомендуемые технологические способы обработки высокоточных деталей машин являются прогрессивными как по обеспечению требуемой точности, качества поверхности, износостойкости, так и по производительности. Ротационное растачивание осуществлялось на станке мод. 1К62 с применением специальной ротационной расточной головки. При шлифовании с виброгашением использовался внутришлифовальный станок мод. 3Б227, оснащенный специальной виброшлифовальной головкой. Ротационное хонингование производилось на станке мод. 3М82С с установленной ротационной хонинговальной головкой. Притирка с дозированным съемом материала выполнялась на станках мод. 2Н135 и 1К62, оснащенных специальными притирочными головками. Раскатывание с регулированием деформирующих усилий производилось на станке мод. 1А730 с применением эластичной раскатной головки специальной конструкции. В качестве обрабатываемого материала использовались стали марки 38ХМЮА, 30Х13, 40Х и 45.

По результатам экспериментальных исследований определены рациональные параметры рассмотренных технологических операций, обеспечивающие оптимальные показатели качества поверхностей деталей. Установлены величины пооперационного изменения показателей качества поверхности, таких как шероховатость, остаточное напряжение, микротвердость при выбранном сочетании рекомендуемых технологических операций. Разработанные и усовершенствованные методы успешно использованы при обработке высокоточных деталей машин в лабораторных условиях и рекомендованы для внедрения в производство.

Ключевые слова: технологический процесс, деталь, шероховатость, остаточное напряжение, микротвердость, поверхность, слой, пооперационное изменение, износ, надежность, машина, оборудование.

Для цитирования:
Гафаров А. М. Исследование пооперационного изменения качества поверхностного слоя высокоточных деталей судовых машин и механизмов, обработанных различными методами / А. М. Гафаров, Ч. М. Алиев, А. М. Кулиев // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2017. — Т. 9. — № 4. — С. 752–764. DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-4-752-764.

Введение

Результаты многочисленных исследований показывают, что разрушение поверхностей деталей машин и оборудования в основном связаны с воздействием на них различных механических и физико-химических процессов. Потеря работоспособности отдельных деталей может проявляться в виде трещинообразования, усталости, коррозии, кавитации, эрозии, адсорбции, пластической деформации, износа, а также факторов смешанного характера [1], [2]. В зависимости от места протекания процессы бывают объемными, поверхностными, протекающими в подвижных и неподвижных соединениях деталей [1], [3]. Наиболее распространенными факторами, оказывающими существенное влияние на долговечность деталей машин и механизмов, являются качественные показатели поверхностного слоя, технологические методы обработки, режимы резания, материалы деталей и т. д. Результаты проведенных исследований [1] показывают, что на износостойкость деталей машин положительное влияние оказывают оптимальные величины шероховатости поверхности R_a, сжимающие остаточные напряжения σ, повышенная величина и глубина распространения микротвердости H поверхностного слоя.

Многие процессы разрушения и старения определяются состоянием и свойствами поверхностных слоев материалов, поэтому обеспечение объемной прочности не всегда гарантирует надежность элементов в целом. Так как физические механизмы процессов и явлений при поверхностном разрушении коренным образом отличаются от объемных механизмов, то обычно наибольшую трудность представляет выбор материалов и обеспечение поверхностной прочности элементов с учетом конструктивных, технологических и эксплуатационных требований [1], [4].

Одной из часто встречающихся причин отказов машин и механизмов является износ поверхностей их ответственных деталей и нарушение условий трения. При конструировании узлов трения необходимо выбирать такой вид трения, формы и размеры трущихся поверхностей деталей, чтобы обеспечить в заданном диапазоне скоростей и нагрузок высокую износостойкость при отсутствии повреждаемости рабочих поверхностей. Эти задачи решаются рациональным сочетанием материалов деталей узлов трения с конструктивными и технологическими мероприятиями, направленными на устранение основных причин, вызывающих конкретный вид повреждаемости [5], [6]. Трущиеся поверхности деталей машин в основном формируются под воздействием тех или иных методов механической обработки. При выборе методов механической обработки деталей следует учитывать следующие основные условия [6]:

– наследственные характеристики механической обработки, которые предшествуют операциям финишной обработки, по возможности не должны влиять на интенсивность будущего эксплуатационного износа;

– операции механической обработки, предшествующие финишным, должны отвечать требованиям, главным образом, по точности и форме детали;

– финишные операции обработки должны формировать поверхности по свойствам (шероховатость поверхности, остаточное напряжение, микротвердость поверхностного слоя), наиболее близким к свойствам, которые устанавливаются на трущихся поверхностях после эксплуатационной приработки, чем обеспечивается минимальный износ в процессе приработки. (Такой износ поверхностей деталей характерен для установившегося процесса);

– при выборе финишных методов обработки следует учитывать технологические возможности применяемых операций и режимы воздействия инструмента на обрабатываемую поверхность.

Из-за многообразия используемых сталей и качественных показателей поверхностных слоев трущихся деталей, а также разных условий изнашивания и приработки деталей машин и механизмов нецелесообразно устанавливать для каждой трущийся пары конкретные качественные показатели поверхностных слоев после приработки. Рациональнее устанавливать взаимосвязи изменения этих показателей в широком диапазоне с режимами и условиями выполнения разных видов финишной обработки. Основным качественным показателем поверхностного слоя деталей машин является шероховатость поверхности R_a. Оптимальными значениями шероховатости поверхности, обеспечивающими минимальный износ трущихся пар, является значение той шероховатости, которое устанавливается в процессе реальной эксплуатации кинематических пар после периода приработки, т. е. в период установившегося износа. Другие показатели качества поверхности (остаточное напряжение и микротвердость поверхностного слоя) должны быть не ниже тех значений, которые формируются в процессе установившегося износа деталей.

На основании изложенного можно предположить, что если удастся получить после механической обработки шероховатость поверхности и другие показатели качества поверхностного слоя равными или превышающими эксплуатационные показатели, а глубина распространения исходных показателей будет близка или превышать величину допустимого износа, то будет решена задача существенного уменьшения износа деталей машин и механизмов.

Анализируя причины выхода из строя типовых деталей машин и механизмов, можно прийти к выводу о том, что эти детали необходимо выделить в отдельные группы и разработать для них типовые или унифицированные технологические планы с нормированными режимами резания и другими условиями обработки. Однако разработка таких унифицированных типовых планов

затруднена выходом из строя деталей машин и механизмов по различным причинам и недостаточной информацией о возможностях различных технологических операций.

Для обеспечения минимальных простоев машин и оборудования, связанных с их ремонтом из-за поломок или износа деталей, необходимо решать проблему увеличения межремонтного периода эксплуатации. Это особенно касается машин и механизмов, эксплуатируемых в чрезвычайных ситуациях и экстремальных условиях, например: пожарное оборудование, различные насосы, специальные гидравлические и пневматические устройства и инструменты и т. д., нефтяное оборудование (электроцентробежные, штанговое скважинные, гидропоршневые, стройные, электровинтовые насосы, вертлюги, газолифтные и др. оборудование), судовые машины и механизмы (брашпили, дизельные двигатели, компрессоры, насосы различных назначений и т. д.).

Для снижения интенсивности поломок и других видов разрушений необходима рационализация технологии механической обработки, существенно повышающая износостойкость и усталостную прочность тех деталей, которые в основном определяют длительность периода непрерывной работы машин и оборудований. К таким деталям относятся цилиндры, плунжеры и втулки насосов, подшипники скольжения грузового вала и турачки брашпиля, цилиндры двигателей внутреннего сгорания, цилиндры, кольца, гильзы различных типов компрессоров и многочисленные высокоточные детали машин и оборудования, отличающиеся нежесткостью, тонкостенностью, чувствительностью к различным технологическим неполадкам, высокими требованиями к показателям по точности и качеству поверхности, труднообрабатываемостью материала, из которого они изготовлены. При проведении экспериментов были использованы высокоточные унифицированные образцы, точность которых находилась в пределах 6- – 8-го квалитетов, в основном близкие по своим геометрическим и качественным показателям к указанным деталям.

Несмотря на многочисленные исследования качества поверхностей деталей машин, имеется мало работ, посвященных комплексному анализу технологических возможностей отдельных финишных методов обработки по этим показателям. Комплексные исследования по рекомендуемым методам фактически отсутствуют, некоторые исключения составляют исследования по ротационному точению. Имеющаяся в технической литературе информация о качестве поверхностей деталей показывает технологические возможности отдельных традиционных методов финишной обработки, не отличается оригинальностью технологических решений и не отражает особенности обработки высокоточных нежестких тонкостенных цилиндрических деталей. Комплексный анализ причин износа высокоточных деталей машин и оборудования показывает, что в кинематической паре «втулка – вал» наибольшему износу подвержены отверстия деталей типа втулок. В среднем износ втулок в 1,9 – 2,1 раза превышает износ валов, что свидетельствует о необходимости первым делом совершенствовать технологические способы повышения износостойкости отверстий. Поэтому разработка новых и усовершенствование существующих способов механической обработки, улучшающих точностные, качественные и износостойкостные характеристики поверхностных слоев высокоточных деталей машин является актуальной задачей машиностроения.

Целью исследования является повышение износостойкости и сопротивления другим видам разрушения высокоточных деталей машин и оборудования путем создания новых и усовершенствования существующих способов обработки и определения технологических возможностей рассмотренных процессов в отношении обеспечения требуемых качественных показателей поверхностного слоя, таких как шероховатость поверхности, остаточное напряжение и микротвердость поверхностного слоя с учетом рационального сочетания последовательно выполняемых операций. Для решения указанной проблемы разработаны оригинальные способы механической обработки, такие как шлифование с виброгашением, ротационное хонингование, притирка с дозированным съемом материала, раскатывание с регулированием деформирующих усилий; усовершенствован процесс ротационного растачивания. Впервые установлена взаимосвязь технологических параметров указанных процессов с комплексом показателей качества поверхности, таких как шероховатость, остаточное напряжение и микротвердость.

Методика проведения экспериментов, применяемое оборудование и оснастка, измерительные приборы и инструменты

Ротационное растачивание осуществлялось на станке мод. 1К62 с применением специальной ротационной расточной головки. При шлифовании с виброгашением использовался внутришлифовальный станок мод. 3Б227, оснащённый специальной виброшлифовальной головкой. Ротационное хонингование производилось на станке мод. 3М82С, на котором установлена специальная конструкция ротационной головки. Притирка с дозированным съемом материала поверхностного слоя выполнялась на станках мод. 2Н135 и 1К62, оснащённых специальными самоустанавливающими приспособлениями для крепления деталей и специальными притирочными головками. Раскатывание с регулированием деформирующих усилий деталей производилось на станке мод. 1А730 с применением специальной конструкции эластичной раскатной головки. В качестве обрабатываемого материала использовались стали марок 38ХМЮА, 30Х13, 40Х и 45.

Эксперименты проводились на унифицированных образцах, по своим точностным и качественным показателям близких к высокоточным деталям указанного оборудования, изготовленных из перечисленных материалов, со следующими размерами: диаметр наружной поверхности 55 мм, диаметр внутренней поверхности 45 мм, длина l = 300 мм. Точность обработанных поверхностей деталей находилась в пределах 6- – 8-го квалитетов. Для установления связи между точностными и качественными показателями обработанных поверхностей деталей контрольные измерения образцов проводились микрометром, индикаторным нутромером, а также рычажно-оптическими приборами. Точность измерения, в зависимости от применяемого мерительного средства и обрабатываемой поверхности, составляла от 0,01 до 0,001 мм. Шероховатость обработанной поверхности измерялась с помощью профилометра — профилографа мод. 201, с записью профилограмм обработанной поверхности согласно методике, изложенной в работе [7]. При определении остаточных напряжений на втулках применяли способ акад. Н. Н. Давиденкова, поскольку образцы могут рассматриваться как тонкостенные трубы. При проведении экспериментов определялись тангенциальные остаточные напряжения. В зависимости от знака остаточных напряжений ширина разреза вырезанного кольца по образующей увеличивается или уменьшается [7], [8]. При исследовании микротвердостей поверхностных слоев использован метод «косого среза» под углом, равным 1,5º.

Выбор рациональных параметров технологических операций

Технологические процессы при выполнении экспериментальных исследований являются прогрессивными как по обеспечению точности и качества поверхности, так и по производительности [6], [9]. Рациональными параметрами рассмотренных технологических операций по обеспечению оптимальных показателей качеств поверхности являются:

а) для ротационного растачивания:
– глубина резания 0,3 – 1,5 мм;
– подача 0,4 – 0,6 мм/об;
– скорость резания 2,0 – 2,4 м/с;
– передний угол заточки 30 – 35º;
– задний угол заточки 26 – 28º;
– угол установки резца в вертикальной плоскости 28º;
– угол установки резца в горизонтальной плоскости 36º;
– ширина упрочняющей фаски до 0,1 мм;
– материал режущей чашки Т15К6, Т5К10, Т14К8;
б) для шлифования с виброгашением:
– скорость вращения детали 1,5 – 1,8 м/с;
– скорость вращения шлифовального круга 40 – 50 м/с;
– продольная подача 15 – 25 мм/об;
– зернистость шлифовального круга 25 – 40 мкм;

в) для ротационного хонингования:
– окружная скорость ротационной хонинговальной головки 0,75 – 1,0 м/с;
– скорость возвратно-поступательного движения 0,15 – 0,2 м/с;
– окружная скорость ротационного ролика 1,8 – 2,5 м/с;
– величина давления ротационного ролика на обрабатываемую поверхность 60 – 80 МПа;
г) для притирки с дозированным съемом материала поверхностного слоя:
– скорость вращательного движения 0,11 – 0,15 м/с;
– скорость возвратно-поступательного движения 0,02 – 0,03 м/с;
– величина удельного давления 150 – 180 кПа;
– зернистость притирочных паст 10 – 20 мкм (для тонких доводочных работ 3 – 5 мкм);
д) для эластичного раскатывания:
– контактное давление 1500 – 1800 Н;
– подача 0,2 – 0,4 мм/об;
– скорость обработки 2,2 – 2,8 м/с;
– диаметр раскатного шарика d = 3 – 6 мм;
– количество рабочих ходов раскатной головки 2 – 3 раза.

Формирование качественных показателей поверхностного слоя деталей после обработки исследованными методами механической обработки

Пооперационное изменение параметров точности и качества поверхности является определяющим фактором при выборе вида и количества технологических операций, что непосредственно влияет на трудоемкость изготовления деталей. Требуемые точность и качество поверхности могут быть достигнуты двумя-тремя или многочисленными технологическими операциями, что приводит к снижению эффективности производства. Поэтому используя параметры пооперационного изменения точности и качества обработанных поверхностей, можно определить оптимальное количество и сочетание технологических операций изготовления высокоточных деталей машин и оборудования.

Как известно, параметры качества поверхности деталей являются случайными величинами и могут быть охарактеризованы с помощью законов теории вероятности. Согласно [5], [6] и [10], для характеристики случайной величины иногда удобно пользоваться не функциями распределения, а количественными показателями, содержащими достаточную информацию о ее распределении. Учитывая, что основными характеристиками случайной величины являются математическое ожидание, дисперсия, моменты, мода, медиана, коэффициент вариации, которые определяют точность и достоверность полученных данных, рассмотрим также их отличительные особенности. Например, математическое ожидание для различных случаев имеет разную интерпретацию [5]:

– для дискретных случайных величин (при измерении шероховатости поверхности на разной базовой длине)

$$M_x = x_{\text{ср}} = \sum_i x_i P(x_i); \tag{1}$$

– для непрерывных случайных величин (при измерении остаточных напряжений поверхностного слоя по методу акад. Н. Н. Давиденкова)

$$M_x = \int_{-\infty}^{+\infty} xf(x)\,dx = \int_{-\infty}^{+\infty} x\,dF(x); \tag{2}$$

– для неотрицательных непрерывных случайных величин (при измерении микротвердости поверхности методом «косого среза»):

$$M_x = \int_0^{\infty} [1 - F(x)]\,dx = \int_0^{\infty} P(x)\,dx. \tag{3}$$

Следует помнить, что математическое ожидание является также начальным моментом первого порядка распределения $F(x)$

$$M_n(x) = \int_{-\infty}^{+\infty} x^n dF(x). \quad (4)$$

Учитывая, что дисперсия характеризует разброс случайной величины и является центральным моментом второго порядка распределения $F(x)$, ее можно рассмотреть как математическое ожидание:

$$D(x) = M\left[x - M(x)\right]^2 = M(x^2) - M^2(x). \quad (5)$$

Для непрерывной случайной величины формула (5) имеет вид:

$$D(x) = \int_{-\infty}^{+\infty} \left[x - M(x)\right]^2 dF(x). \quad (6)$$

Другие характеристики случайной величины определяются согласно методике, изложенной в работе [5].

Основной задачей экспериментальных исследований является определение технологических возможностей разработанных технологических методов обработки по обеспечению качественных показателей поверхностного слоя деталей и их пооперационное изменение. В результате проведенных работ определены величина шероховатости поверхности R_a, остаточное напряжение σ и микротвердость поверхностного слоя H на операциях ротационного точения, шлифования с виброгашением, ротационного хонингования, притирки с дозированным съемом материала поверхностного слоя и раскатывания с регулированием деформирующих усилий. На рис. 1 приведен график пооперационного изменения шероховатости R_a поверхности при различных методах механической обработки.

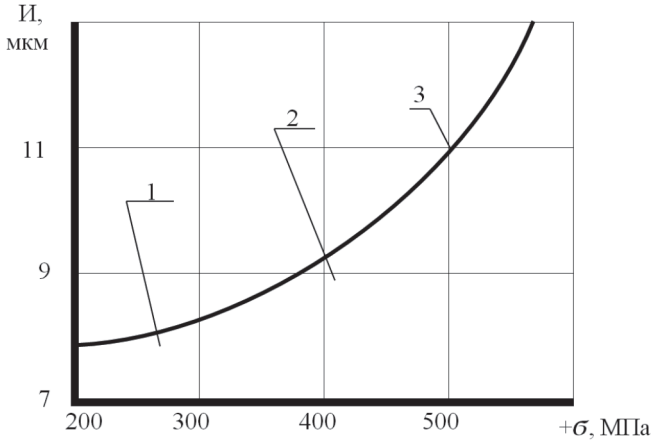


Рис. 1. Зависимость износа деталей *И* от остаточных напряжений поверхностного слоя σ (поверхность обработана ротационным резанием):
1 — сталь 30Х13; *2* — сталь 40Х; *3* — сталь 45

Одним из прогрессивных технологических процессов механической обработки высокоточных деталей машин и механизмов является ротационное резание. Для осуществления вращательного движения режущей части ротационного инструмента известны два вида ротационного резания: с принудительным вращением от специального привода и самовращением в результате взаимодействия с обрабатываемым материалом. В зависимости от ориентации режущей чашки также имеются две схемы: прямая и обратная. При первой схеме торец чашки выполняет функцию передней поверхности, при второй — задней. Если режущая чашка наклонена в направлении вектора подачи инструмента относительно обрабатываемой поверхности, имеет место прямая схема резания. Противоположное направление соответствует обратной схеме [6]. Обычно для обработки

труднообрабатываемых материалов рекомендуется обратная схема резания. Рациональной областью применения прямой схемы является чистовая обработка. Анализ проведенных исследований показывает, что ротационным инструментом можно обеспечить шероховатость обработанной поверхности в пределах R_a = 0,8 – 1,0 мкм.

Преимуществом ротационного резания является то, что оно может быть использовано как в качестве предварительного, так и окончательного метода обработки, одновременно обеспечивая высокую производительность процесса и большую стойкость режущего инструмента. Однако при изготовлении высокоточных деталей ротационное резание может быть использовано как получистовой метод обработки до процесса шлифования [7].

Процесс шлифования с виброгашением является новым технологическим процессом механической обработки. В зависимости от требований к точности и качеству обрабатываемой поверхности он может быть использован в качестве финишной обработки, а по необходимости также как предварительный процесс под хонингованием. Шероховатость поверхности после шлифования с виброгашением находится в пределах R_a = 0,3 – 0,8 мкм. Из-за снижения вибрации технологической системы при шлифовании с виброгашением качественные показатели поверхностного слоя существенно улучшаются, что приводит к благоприятным эксплуатационным характеристикам контактных поверхностей деталей.

При ротационном хонинговании режущие бочкообразные ролики устанавливаются под углом к оси хонинговальной головки и при обработке деталей имеют возможность вращения вокруг своих осей [6]. Для ротационного хонингования характерна прерывистость следов на обрабатываемой поверхности, что является результатом постоянного обновления режущих частей бочкообразных алмазных роликов. При этом прерывистость резания единичных зерен сопровождается процессом стабильного стружкообразования. Постоянное обновление режущей части алмазных роликов ротационной хонинговальной головки позволяет во время холостого пробега промывать рабочие участки инструмента смазывающей охлаждающей жидкостью и охлаждать их. При ротационном хонинговании не происходит налипания металла на контактную часть поверхности роликов. Процесс обработки осуществляется под воздействием новых обновленных участков алмазных роликов, что существенно повышает качественные показатели поверхностного слоя деталей (рис. 2).

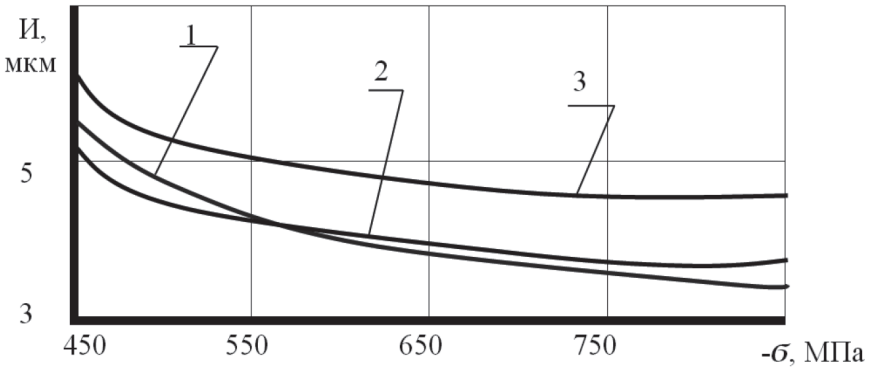


Рис. 2. Зависимость износа деталей *И* от остаточных напряжений поверхностного слоя σ (поверхность обработана алмазным выглаживанием):
1 — сталь 30Х13; *2* — сталь 40Х; *3* — сталь 45

Шероховатость обработанной поверхности при ротационном хонинговании изменяется в пределах R_a = 0,15 – 0,45 мкм. Ротационное хонингование может быть использовано как в качестве чистовой, так и окончательной операции, а также в качестве предварительной тонкой притирочно-доводочной операции.

Притирка с точки зрения формирования поверхностного слоя является сложным технологическим процессом и зависит от приложенной нагрузки, от направления движения зерен при-

тирочных паст, от скорости перемещение зерен, исходной шероховатости и др. Использование мелкозернистых паст в процессе притирки, наряду с уменьшением шероховатости обработанной поверхности, снижает также и производительность обработки. Микрорезание переходит к полированию. В связи с этим следует разработать такие методы обработки притиркой, которые позволяют обеспечить, наряду с требуемой шероховатостью поверхности, и высокую производительность. Одним из таких методов является притирка с дозированным съемом материала поверхностного слоя. Этот метод позволяет при помощи специального устройства регулировать разжим притира по мере съема материала поверхностного слоя, заполнять поверхность притира и зону обработки пастой необходимой толщины и, по мере износа притира, освобождать отработанную пасту из зоны резания и добавлять дополнительную порцию пасты. Следует учитывать, что изменение размеров абразивных частиц в составе притирочных паст существенно изменяет характер процесса микрорезания и химического воздействия на обрабатываемую поверхность. Шероховатость обработанной поверхности при дозированной притирке может быть изменена в широких пределах регулированием основных параметров технологического процесса. Шероховатость притиранных поверхностей при оптимальных параметрах режимов обработки находится в пределах R_a = 0,05 – 0,15 мкм.

Притирка с дозированным съемом материала поверхностного слоя является финишным методом обработки, однако при необходимости может быть использована как предварительная операция под раскатывание с регулированием деформирующих усилий высокоточных деталей.

Шероховатость поверхности при раскатывании с регулированием деформирующих усилий формируется под воздействием упругого-пластического деформирования тонкого поверхностного слоя. При раскатывании с регулированием деформирующих усилий для уменьшения вредного влияния повышенных сил обработки на точностные параметры поверхностей нежестких тонкостенных деталей в конструкции раскатной головки предусмотрено специальное устройство для регулирования деформирующих сил [9]. Использование ротационного растачивания перед шлифованием с виброгашением, шлифования с виброгашением перед ротационным хонингованием, ротационного хонингования перед притиркой с дозированным съемом материала поверхностного слоя, притирки с дозированным съемом материала поверхностного слоя перед раскатыванием с регулированием деформирующих усилий позволяет уменьшать шероховатость обработанной поверхности в пять-шесть раз. Однако следует отметить, что совместное применение процессов ротационного хонингования с притиркой с дозированным съемом материала поверхностного слоя, притирки с дозированным съемом материала поверхностного слоя с раскатыванием или ротационного хонингования с раскатыванием с регулированием деформирующих усилий неэффективно, и такие схемы обработки могут быть использованы в случае крайней необходимости. Результаты экспериментов показывают, что при рациональных величинах сил раскатывания фактически на первой стадии обработки происходит полная деформация неровностей, формирующихся в течение предыдущих операций. Дальнейшие увеличение сил раскатывания приводит к пластическим искажениям поверхностного слоя, которые ухудшают не только показатели шероховатости, но и физико-механические характеристики поверхностей деталей. Шероховатость поверхности, обработанной раскатыванием с регулированием деформирующих усилий, находится в пределах R_a = 0,05 – 0,1 мкм.

Одним из основных показателей, характеризующих качественные показатели поверхностей деталей, является микротвердость H поверхностного слоя. На рис. 3 показаны графики пооперационного изменения микротвердости поверхностного слоя при ротационном растачивании, шлифовании с виброгашением, ротационном хонинговании, притирке с дозированным съемом материала поверхностного слоя и раскатывании с регулированием деформирующих усилий. Наибольшей микротвердостью H характеризуются поверхности, обработанные раскатыванием с регулированием деформирующих усилий, наименьшей — шлифованием с виброгашением. Микротвердость поверхностей, обработанных указанными методами, в зависимости от обрабатываемых материалов изменяется в пределах 4700 – 9500 МПа.

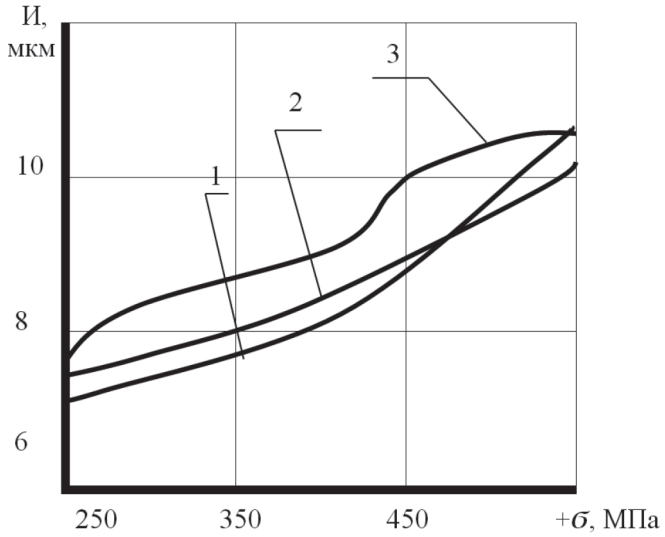


Рис. 3. Зависимость износа деталей *И* от остаточных напряжений поверхностного слоя σ (поверхность обработана шлифованием):
1 — сталь 30Х13; *2* — сталь 40Х; *3* — сталь 45

Формирование микротвердости *Н* поверхностного слоя происходит под действием многочисленных факторов и основывается на комплексном воздействии конструктивных, технологических и режимных параметров. Фактически единственным способом, позволяющим регулировать качество поверхностного слоя деталей машин, являются технологические методы [6], [11].

Результаты проведенных работ показывают, что обеспечение поверхностей с заданной микротвердостью существенно уменьшает смятия и стирания поверхностей, снижает уровень пластической деформации контактных участков, ограничивает взаимное внедрение деформированных слоев поверхностей деталей. Характер пооперационного изменения остаточных напряжений σ поверхностного слоя при рассмотренных технологических операциях показан на рис. 4.

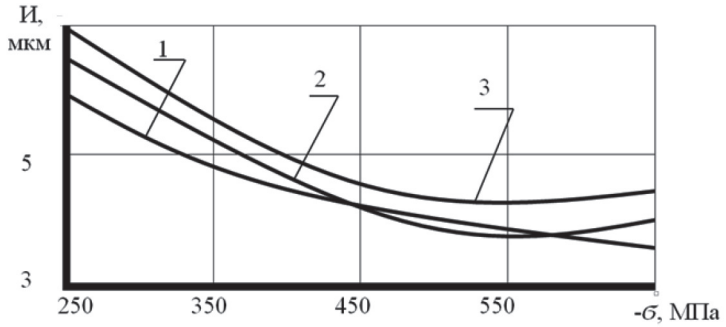


Рис. 4. Зависимость износа деталей *И* от остаточных напряжений поверхностного слоя σ (поверхность обработана хонингованием):
1 — сталь 30Х13; *2* — сталь 40Х; *3* — сталь 45

По результатам экспериментальных исследований установлено, что для ротационного растачивания и шлифования с виброгашением характерны растягивающие для ротационного хонингования притирки с дозированным съемом материала поверхностного слоя и раскатывания с регулированием деформирующих усилий, сжимающие остаточные напряжения. Формирование на поверхностных слоях деталей растягивающих остаточных напряжений после ротационного растачивания и шлифования с виброгашением связаны с высокими температурами, возникающими в зоне резания в процессе обработки (600 – 650 °С — при ротационном растачивании;

800 – 850 °С — при шлифовании с виброгашением). При ротационном хонинговании и притирке с дозированным съемом материала поверхностного слоя образования на поверхностях деталей, снимающих остаточные напряжения, являются результатом облегчения условий пластической деформации поверхностного слоя по сравнению с предыдущими методами механической обработки. Ротационное хонингование и притирку с дозированным съемом материала поверхностного слоя можно отнести к так называемым «холодным» видам механической обработки (температура в зоне обработки в зависимости от условий обработки изменяется в пределах 120 – 250 °С) — рис. 5.

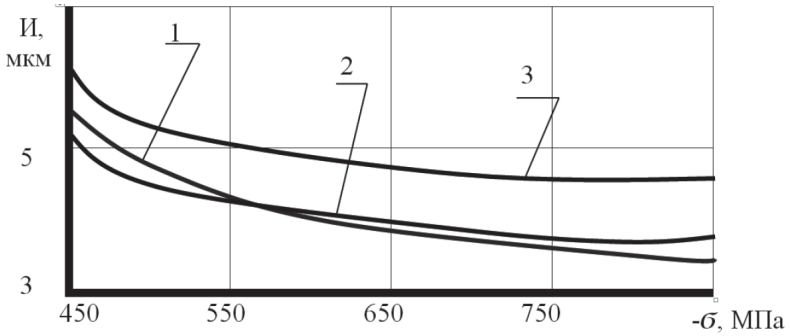


Рис. 5. Зависимость износа деталей *И* от остаточных напряжений поверхностного слоя σ (поверхность обработана притиркой):
1 — сталь 30Х13; *2* — сталь 40Х; *3* — сталь 45

Эффективность раскатывания с регулированием деформирующих усилий определяется в зависимости от режимов обработки, состояния и свойств обрабатываемых материалов, от геометрических параметров деформирующих элементов раскатной головки и т. д. При раскатывании с регулированием деформирующих усилий, из-за возможности регулирования давления, на поверхности происходит поэтапное сглаживание сначала наиболее острых выступов, а потом нижележащих неровностей. В процессе раскатывания с регулированием деформирующих усилий растянутые поверхности, формирующиеся предыдущими операциями со снятием стружки, вместе с припусками, предусмотренными для раскатывания, сжимаются, иногда дополнительно деформируются и создают на поверхностном слое деталей сжимающие остаточные напряжения.

Выводы и основные результаты

Разработаны новые прогрессивные методы механической обработки, установлены их технологические возможности, определен характер изменения качественных показателей поверхностей деталей при их применении. Решение перечисленных задач направлено на существенное повышение эффективности машиностроительного производства. Подтверждены возможности применения процессов ротационного растачивания, шлифования с виброгашением, ротационного хонингования, притирки с дозированным съемом материала поверхностного слоя и раскатывания с регулированием деформирующих усилий при обработке высокоточных нежестких тонкостенных деталей. Определен комплекс технологических условий, обеспечивающих требуемые качества обработанных поверхностей деталей. При рекомендуемой последовательности выполняемых операций величина шероховатости поверхности изменяется в пределах 1,0 – 0,005 мкм, остаточное напряжение σ — от +600 МПа до –920 МПа, микротвердость поверхностного слоя *Н* в пределах 5200 – 10500 МПа. При операциях ротационного точения и шлифования на поверхностном слое формируются, главным образом, растягивающие остаточные напряжения, на операциях ротационного хонингования, притирки с дозированным съемом материала поверхностного слоя и раскатывания с регулированием деформирующих усилий — сжимающие остаточные напряжения.

В результате проведенных исследований усовершенствован процесс ротационного растачивания, разработаны новые методы обработки, такие как шлифование с виброгашением, ротационное хонингование, притирка с дозированным съемом материала поверхностного слоя и раскатывание с регулированием деформирующих усилий, которые обеспечивают требуемую точность обработки в пределах 6 – 8-го квалитетов и высокое качество обработанной поверхности. На методы ротационного хонингования, притирки с дозированным съемом материала поверхностного слоя и раскатывания с регулированием деформирующих усилий получены авторские свидетельства на изобретение.

Разработанные методы и результаты исследований могут быть успешно применены при обработке высокоточных деталей машин с целью обеспечения требуемых точностных, качественных и износостойкостных характеристик поверхностных слоев. Результаты проведенных работ рекомендованы для внедрения в производство.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Гафаров А. М.* Износостойкость тяжелонагруженных деталей машин и механизмов, эксплуатируемых в экстремальных условиях / А. М. Гафаров, П. Г. Сулейманов // Технология машиностроения. — 2011. — № 5. — С. 37–41.

2. *Герасимова А. М.* Анализ взаимодействия гидроабразивной струи с внутренней поверхностью канала фокусирующего сопла / А. М. Герасимова, А. Л. Галиновский, В. И. Колпаков // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. — 2015. — № 9 (666). — С. 59–67.

3. *Гулиев С. М.* Взаимодействие двоякопериодической системы инородных упругих включений и прямолинейных трещин с концевыми зонами при предольном сдвиге / С. М. Гулиев // Теоретическая и прикладная механика. — 2010. — № 2. — С. 72–79.

4. *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.

5. *Невзоров В. Н.* Надежность машин и оборудований / В. Н. Невзоров, Е. В. Сучак. — Красноярск: Изд-во СГТУ, 1998. — 264 с.

6. *Гафаров А. М.* Прогрессивные методы механической обработки: в 2 т. / А. М. Гафаров. — Баку: Наука, 2001.

7. *Гафаров А. М.* Ротационное точение / А. М. Гафаров. — Баку: Наука, 2000. — 128 с.

8. *Кравченко Б. А.* Силы, остаточные напряжения и трение при резании металлов / Б. А. Кравченко. — Куйбышев: Куйбышевское кн. изд-во, 1962. — 180 с.

9. Пат. J20120090 Азербайджанская республика, ГКСМР (03.12.2010). Раскатная головка для обработки нежестких тонкостенных деталей / А. М. Гафаров, П. Г. Сулейманов; заяв. Академия МЧС Азербайджанской республики. — a20100270; заявл. 29.12.2010; опубл. 27.09.2012.

10. *Гафаров А. М.* Методика оценки надежности машин и оборудования, эксплуатируемых в экстремальных условиях / А. М. Гафаров, П. Г. Сулейманов, В. А. Гафаров // Технология машиностроения. — 2014. — № 7. — С. 40–44.

11. *Солер Я. И.* Обеспечение точности формы инструментов при плоском шлифовании кругом Horton Vitrim / Я. И. Солер, Нгуен Ван Кань // Вестник машиностроения. — 2016. — № 11. — С. 51–58.

REFERENCES

1. Gafarov, A. M. and P. G. Suleimanov. “Iznosostoikost’ tyazhelonagruzhennykh detalei mashin i mekhanizmov, ekspluatiruemykh v ekstremal’nykh usloviyakh.” *Tekhnologiya mashinostroeniya* 5 (2011): 37–41.

2. Gerasimova, Anastasia Mikhailovna, Andrey Leonidovich Galinovsky, and Vladimir Ivanovich Kolpakov. “Analysis of the Interaction between the Abrasive Jet Stream and the Inner Surface of the Jet Forming Nozzle.” *Proceedings of Higher Educational Institutions. Machine Building* 9(666) (2015): 59–67.

3. Guliev, S. M. “Vzaimodeistvie dvoyakoperiodicheskoi sistemy inorodnykh uprugikh vklyuchenii i pryamolineinykh treshchin s kontsevymi zonami pri predol’nom sdvige.” T*eoreticheskaya i prikladnaya mekhanika* 2 (2010): 72–79.

4. 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.

5. Nevzorov, V. N., and E. V. Suchak. *Nadezhnost' mashin i oborudovanii*. Krasnoyarsk: SGTU, 1998.

6. Gafarov, A. M. *Progressivnye metody mekhanicheskoi obrabotki*. Baku: Nauka, 2001.

7. Gafarov, A. M. *Rotatsionnoe tochenie*. Baku: Nauka, 2000.

8. Kravchenko, B. A. *Sily, ostatochnye napryazheniya i trenie pri rezanii metallov*. Kuibyshev: Kuibyshevskoe knizhnoe izdatel'stvo, 1962.

9. Gafarov, A. M., and P. G. Suleimanov. The Republic of Azerbaijan J20120090, GKSMR (03.12.2010). Raskatnaya golovka dlya obrabotki nezhestkikh tonkostennykh detalei. Publ. 27 Sept. 2012.

10. Gafarov, A. M., P. G. Suleimanov, and V. A. Gafarov. "Metodika otsenki nadezhnosti mashin i oborudovaniya, ekspluatiruemykh v ekstremal'nykh usloviyakh." *Tekhnologiya mashinostroeniya* 7 (2014): 40–44.

11. Soler, Ya. I., and Van Kan' Nguen. "Assurance of tools form accuracy at plane grinding by Norton Vitrium wheel." *Vestnik Mashinostroeniya* 11 (2016): 51–58.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Гафаров Айдын Мамиш оглы —
доктор технических наук, профессор
Азербайджанская Государственная морская академия
1005, Азербайджанская Республика, Баку, ул. М. А. Расулзаде, 5
e-mail: *Aydin.Qafarov@hotmail.com*

Алиев Чингиз Мансур оглы —
кандидат технических наук, доцент
Азербайджанская Государственная морская академия
1005, Азербайджанская Республика, Баку, ул. М. А. Расулзаде, 5
e-mail: *C.Aliyev@caspar.az*, *chingiz.aliyev@acsc.az*

Кулиев Алимардан Мамедрза оглы —
доцент
Азербайджанская Государственная морская академия
1005, Азербайджанская Республика, Баку, ул. М. А. Расулзаде, 5
e-mail: *alimardan.quliyev@acsc.az*

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Gafarov, Aydin M. —
Dr. of Technical Sciences, professor
Azerbaijan State Marine Academy
5 M.A. Rasulzada Str., Baku, 1005, Azerbaijan Republic
e-mail: *Aydin.Qafarov@hotmail.com*

Aliyev, Chingiz M. —
PhD, associate professor
Azerbaijan State Marine Academy
5 M.A. Rasulzada Str., Baku, 1005, 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, 1005, Azerbaijan Republic
e-mail: *alimardan.quliyev@acsc.az*

Статья поступила в редакцию 13 апреля 2017 г.
Received: April 13, 2017.

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

DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-4-765-776

3D-PRINTING FROM PLASTICS: INNER STRUCTURE INFLUENCE ON THE STRENGTH

V. M. Petrov[1], S. N. Bezpal'chuk[1] , S. P. Yakovlev[2]

[1] — Saint Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering, St. Petersburg, Russian Federation
[2] — Baltic State Technical University «VOENMEH» named after D.F. Ustinov, St. Petersburg, Russian Federation

Development of ship structures production additive technologies implies, among other things, provision and control of product quality. Is this work, on the polylactide example, is investigated materials for 3D-printing strength variation during thread melting and formed by filaments inner structure constructing. Experiments showed that strength doesn't change during melting, and depends nonmonotonically from infill density. Last feature confirms by finite-element modelling: during small (less than 50 percent) infill density, when infill density increases, characteristic inner structure cell size decreases, what leads to sharp increase of stress concentrators per volume unit number (respectively, significant increasing of probable defects number in concentrators surroundings). During further (more than 50 percent) infill density increasing, part of filaments contact surface in surface with nonzero normal external load projection is becoming more than 50 percent, and structure strength determines by filament adhesion.

Results obtained points that when infill density is low (less than 50 percent), we should to control firstly filament mechanical strength, and determined by printing head positioning accuracy accuracy of filaments (which are forming inner structure and shell of part designed) location; technological parameters, which influence on partitions between cells rounding radiuses. While infill density is high (more than 50 percent) —melt falling from printing head extruder nozzle high, filament stacking and filament solidification times relation, what determines filaments adhesion; technological defects, which are impeding to filaments adhesion; turning special attention on material supplied chemical composition, and responsible for the aging of material time and conditions of it's storage. Recommendations listed may form the basis of automatic technological manufacturing using 3D-printing products strength control concept.

For modelling and structural analysis, seems possible to introduce elementary volume for cell structure. Phenomenological parameters can be obtained using mechanical (while infill less than 50 percent) or adhesion characteristics.

Keywords: additive technologies, 3D printing, mechanical tests, physical and mechanical properties, internal structure, stress concentration, adhesion, destruction, finite element simulation, test standards, technological strength control, conjecture hypothesis.

For citation:
Petrov, Vladimir M., Sergey N. Bezpal'chuk, and Sergey P. Yakovlev. "3D-printing from plastics: inner structure influence on the strength." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 9.4 (2017): 765–776. DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-4-765-776.

УДК: 004.9, 620.172.2, 67.02

О ВЛИЯНИИ СТРУКТУРЫ НА ПРОЧНОСТЬ ИЗДЕЛИЙ ИЗ ПЛАСТИКОВ, ПОЛУЧАЕМЫХ МЕТОДОМ 3D-ПЕЧАТИ

В. М. Петров[1], С. Н. Безпальчук[1], С. П. Яковлев[2]

[1] — Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет, Санкт-Петербург, Российская Федерация
[2] — Балтийский государственный технический университет «ВОЕНМЕХ» им. Д. Ф. Устинова, Санкт-Петербург, Российская Федерация

Освоение аддитивных технологий производства судовых конструкций подразумевает в том числе обеспечение и контроль качества получаемых изделий. В работе на примере полилактида, поставляемо-

го в форме нити в катушках, исследуется изменение прочности материалов для 3D-прототипирования в процессе изготовления состоящей из волокон ячеистой структуры. Испытания показали, что прочность при плавке практически не меняется, а от плотности заполнения внутреннего объёма зависит немонотонно. Последняя особенность подтверждается конечно-элементным моделированием: с увеличением плотности заполнения уменьшается размер ячейки внутренней структуры, что приводит к возрастанию числа концентраторов напряжений на единицу объёма и, соответственно, к повышению вероятного числа дефектов, попадающих в области концентрации пропорционально квадрату числа ячеек на единицу длины. При дальнейшем (свыше 50 %) увеличении плотности заполнения доля поверхностей сопряжения волокон в общей площади поверхности волокон, на которую передаётся нормальная нагрузка, становятся больше 50 %, и прочность структуры начинает определяться адгезией волокон.

Полученные результаты указывают на то, что при невысокой плотности заполнения в процессе изготовления изделий следует контролировать, в первую очередь, механическую прочность волокон и определяемую точностью позиционирования печатающей головки точность их расположения, влияющие на радиусы скругления перегородок между ячейками технологические параметры, при большой плотности заполнения — высоту падения расплава из форсунки экструдера печатающей головки, соотношение времени укладывания волокна и времени его затвердевания, определяющие адгезионное сцепление волокон, а также технологические дефекты, препятствующие адгезии, обращая особое внимание на химический состав поставляемого материала, а также ответственные за старение время и условия его хранения. Перечисленные рекомендации могут быть положены в основу концепции технологического управления прочностью изделий, получаемых методом 3D-печати.

В целях расчёта и моделирования представляется возможным ввести понятие «физически бесконечно малого объёма структуры». Феноменологические параметры следует при этом определять через механические либо адгезионные характеристики в зависимости от плотности заполнения внутреннего объёма изделия.

Ключевые слова: аддитивные технологии, 3D-печать, механические испытания, физико-механические свойства, внутренняя структура, концентрация напряжений, адгезия, разрушение, конечно-элементное моделирование, стандарты на испытания, технологическое управление прочностью, гипотеза сплошности.

Для цитирования:
Петров В. М. О влиянии структуры на прочность изделий из пластиков, получаемых методом 3D-печати / В. М. Петров, С. Н. Безпальчук, С. П. Яковлев // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2017. — Т. 9. — № 4. — С. 765–776. DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-4-765-776.

Введение (Introduction)

Широко известно, что в настоящее время аддитивные технологии позиционируются как технологии, способные заменить традиционные подходы к изготовлению деталей сложной геометрической формы самого различного назначения (в том числе элементов конструкций водного транспорта). Вместе с тем нельзя утверждать, что прочностные характеристики и физико-механические свойства получаемых деталей идентичны параметрам материала и в каждом конкретном случае известны. Изготовляемые по технологии 3D-печати изделия имеют, как правило, ячеистую внутреннюю структуру, процесс их получения предусматривает фазовые переходы материала. Таким образом, на прочность изделия, помимо прочности исходного материала, зависящей также от времени и условий его хранения, химического состава красителей и других факторов, определяющих влияние физических и физико-химических процессов, оказывают влияние также параметры внутренней структуры заполнения:

– плотность, выражаемая в процентном содержании материала во внутреннем объёме изделия; форма и относительные размеры структурных элементов (в частности, отношение размера ячейки к толщине стенки между ячейками);

– параметры технологии получения изделий (высота падения подаваемого из форсунки экструдера печатающей головки материала, температура подаваемого материала);

– диаметр форсунки, скорость подачи (расход через форсунку и др.);

– условия окружающей среды, влияющие на скорость и характер затвердевания материала и т. д.

Выполненный обзор литературных источников [1] – [10] не позволяет сделать вывод о систематическом характере исследований о влиянии перечисленных факторов на прочность получаемых по технологии 3D-печати изделий. Настоящей работой открывается цикл статей, ставящий своей целью выработку магистрального направления систематизации на базе исследования влияния основных факторов на прочность изделий. Результатами исследований должны явиться массивы физико-механических характеристик и диаграмм растяжения материалов различной внутренней структуры, полученные обобщением результатов испытаний, а также стандарты на испытания материалов изделий, получаемых методом 3D-печати. Испытания каждого вида изделий проводятся в соответствии с блок-схемой (рис. 1).

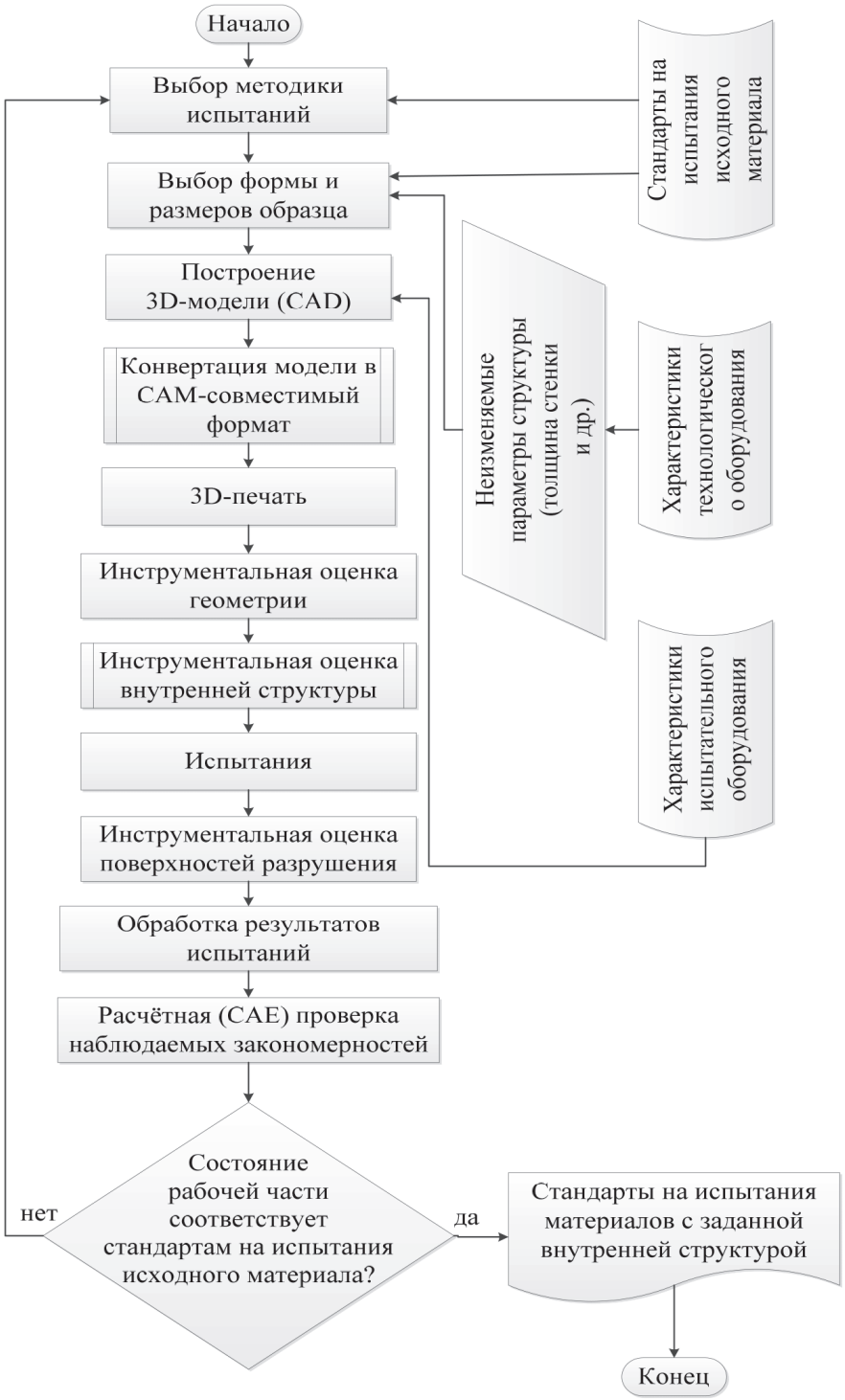


Рис. 1. Блок-схема алгоритма испытаний

Методы и материалы (Methods and Materials)

Одним из основных недостатков многих материалов для 3D-печати (гипсовые композиты, отдельные виды пластиков и др.) является хрупкость, что обуславливает особую актуальность исследования их прочности. Для анализа выбран один из наиболее хрупких (оценка произведена по ударной вязкости) пластиков — полилактид (PLA, плотность 1200 – 1250 кг/м^3, предел прочности при изгибе 65 МПа, модуль упругости при изгибе 2,5 ГПа, коэффициент Пуассона 0,4, относительное удлинение при разрыве 4,43 %, ударная вязкость 4,28 кДж/м^2) производителя *BestFilament*, Россия (диаметр нити — 1,75 мм, краситель — диоксид титана (марка «Версал зелёный BG», производитель — *Synthesia*, Чехия), срок хранения (учёт важен вследствие охрупчивания материала при старении) —12 мес., фактический срок хранения — 6 мес. при нормальных условиях.

Из всего множества факторов, влияющих на прочность изделий из пластиков (время хранения исходного материала, химический состав красителя, процентная плотность и структура (форма ячеек) заполнения внутренних объёмов), для исследования была выбрана плотность заполнения. Изучался предел прочности при одноосном растяжении. Для выяснения прочности исходного материала, поставляемого в форме нити диаметром 1,75 мм, намотанной в катушку внутренним диаметром 6,7 см и внешним 17 см (соответственно имеет место начальная кривизна нити), испытывались по стандартной методике 10 распрямлённых фрагментов нити, длиной 120 мм каждый (длина рабочей части 80 мм, размер законцовок для крепления образца в захватах испытательной машины 20 мм с каждой стороны) — рис. 2, *а*.

Испытания проводились стандартным методом в Механической лаборатории СПбГАСУ на разрывной машине INSTRON 5969. Прочность структурного элемента (волокна), переплавленного при 3D-печати (использовался 3D-принтер PrismMini фирмы *3Dquality*) материала определялась испытаниями ленты (полосы) толщиной в одно волокно (0,4 мм — диаметр форсунки печатающей головки 3D-принтера) и шириной в 20 волокон, т. е. 8 мм (рис. 2, *б*). Поскольку с увеличением высоты падения расплава из форсунки экструдера печатающей головки адгезионная прочность нитей падает, технологически целесообразно изготавливать ленты при высоте падения 0,25 мм. В таком случае толщина образца составляет 0,25 мм, на ширине умещается 10 волокон. Длина рабочей части ленты составляла 10 наибольших поперечных размеров (80 мм), размер зон законцовок с каждой стороны — 20 мм. В партии было 10 образцов. Волокна при печати укладывались в горизонтальной плоскости. Аналогичным образом изготавливалось и испытывалось одно волокно.

Отметим, что технологические остаточные напряжения снижают прочность имеющей плотность заполнения 100 % структуры по сравнению с прочностью переплавленного материала, что не позволяет использовать для подобных испытаний образцы со значительным числом волокон в двух поперечных измерениях. Исследовалась прочность каркаса (оболочки) рабочей части образца для испытаний на растяжение (рис. 2, *в*). Для рассматриваемого нового материала, на основании п. 2.2 ГОСТ 14359-69, использовались стандартные образцы согласно ГОСТ 11262-80, тип 1. Толщина стенки оболочки *t* задавалась равной 1,2 мм (трём волокнам материала) для обеспечения жёсткости образцов. В силу указанного обстоятельства, стандартная толщина образца (2 мм) была увеличена до 5 мм. Образцы изготавливались в горизонтальном положении, при наклоне волокон к главным осям сечения 45°.

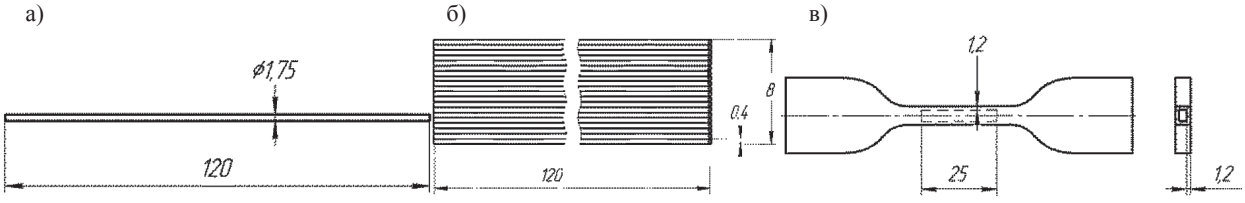


Рис. 2. Эскизы образцов для определения характеристик исходного и переплавленного материала:
а — нить исходного материала; *б* — лента из волокон переплавленного материала;
в — изготовленный на 3D-принтере каркас рабочей части

Прочность ячеистой структуры исследовалась на аналогичных образцах (рис. 3). Образцы изготавливались (выращивались) послойной укладкой волокон расплавленного полилактида в горизонтальном и вертикальном положении. Плотность заполнения объёма образцов варьировалась от 20 до 80 % с шагом 30 % (размер ячейки составлял 4,0; 0,8 и 0,4 мм соответственно на рис. 4). В каждой партии, соответствующей той или иной комбинации двух указанных параметров (угла наклона оси образца к горизонтальной плоскости и плотности заполнения), было пять образцов. Стенки образцов, изготавливаемые послойным обходом контура, составляющие внутреннюю структуру (квадратные ячейки) волокна, укладывались под углом 45°к оси образца при горизонтальном расположении последнего и к главным осям сечения при вертикальном.

Алгоритм построения структуры взаимно ортогональных волокон предусматривал укладку целого слоя либо нескольких слоёв в одном направлении с последующим изменением направления движения печатающей головки на 90°. Контур и внутренняя структура строились независимо (ориентация ячеек в плоскости продольного либо поперечного сечения образца определяется ориентацией образца на столе 3D-принтера при изготовлении), сопряжение заполнения и внешней стенки (оболочки) происходит при затвердевании расплава.

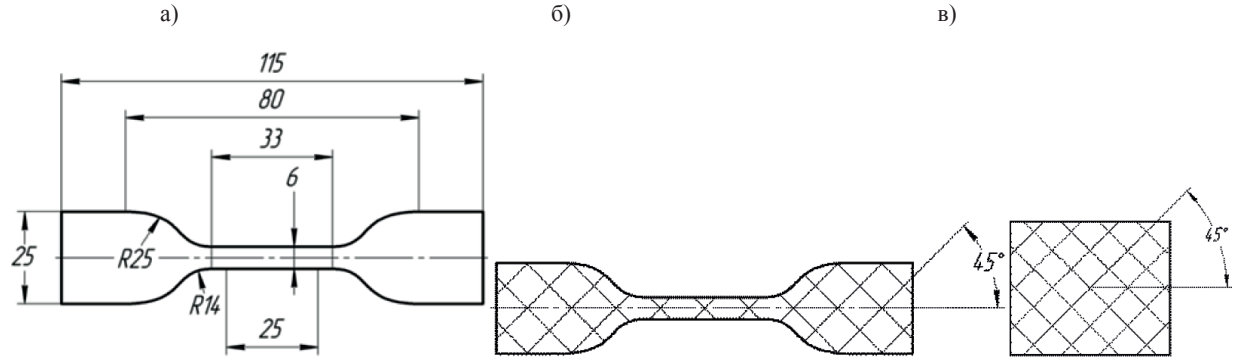


Рис. 3. Эскиз образца для определения характеристик ячеистой структуры (*а*) и расположение ячеек для образцов, изготавливаемых в горизонтальном (*б*) и вертикальном (*в*) положении

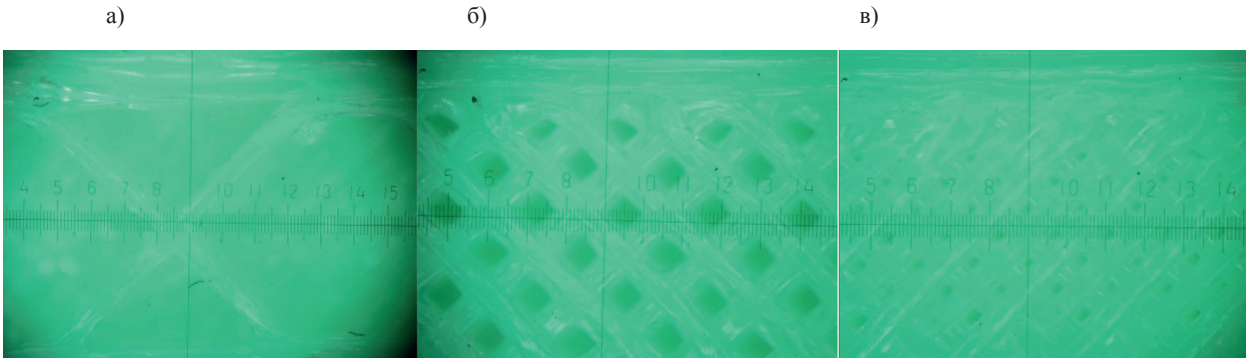


Рис. 4. Внутренняя структура образцов с различной плотностью заполнения: *а* — 20 %; *б* — 50 %; *в* — 80 %

Экспериментально оценивалось условное брутто-напряжение, соответствующее пределу прочности (характеристика несущей способности). Испытания проводились стандартным методом в Механической лаборатории СПбГАСУ на разрывной машине INSTRON 5982 с установленным экстензометром (рис. 5).

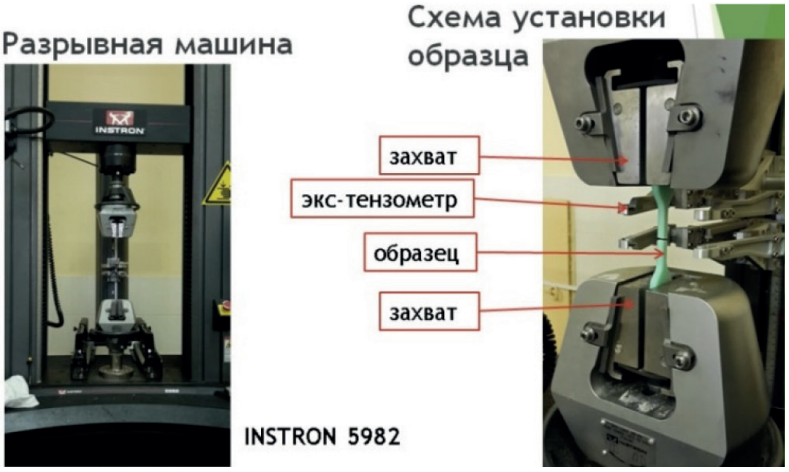


Рис. 5. Схема испытаний образцов на разрывной машине INSTRON 5982

Ячеистая структура получаемых материалов обуславливает наличие значительного числа внутренних углов (концентраторов напряжений) на единицу объёма, технология изготовления последовательной укладкой волокон расплавленного пластика — существенное влияние адгезии волокон на прочность. Можно показать, что с уменьшением размера ячейки области концентрации от соседних углов стремятся к объединению и при определённом размере, соответствующем равномерному распределению напряжений с отклонениями, не превышающими отклонения, вызванные дефектами материала, ячеистый материал ведёт себя как сплошная ортотропная среда. Тогда весьма корректным будет понятие *физически бесконечно малого объёма внутренней структуры*, вводимое по аналогии с атомно-молекулярной структурой. Фактором, лимитирующим прочность, оказывается адгезия волокон. При этом в расчётной модели можно пренебречь адгезией заполнения к оболочке, ввиду сравнительно малой доли площади контакта волокон внутренней структуры с волокнами оболочки в общей площади контакта волокон, и рассматривать структуру волокон как полубесконечную (на практике — с характерным размером, много большим размера сечения волокна, порядка ширины рабочей части образца).

Качественный анализ концентрации напряжений проводился в упругой постановке задачи, на концептуальных моделях, описывающих влияние того или иного фактора на прочность. Так, для изучения адгезии достаточно рассмотреть два жёстко соединённых слоя, нагружаемых для оценки коэффициента концентрации напряжений единичным растягивающим брутто-напряжением (для образцов, выращенных в горизонтальном положении) в наклонённых к оси на угол 45° сечениях волокон (поперечное сечение волокна считалось квадратным со стороной 0,4 мм и скруглениями углов радиусом 0,1 мм) — рис. 6, *а* либо нормально к боковым поверхностям волокон для образцов, изготовленных в вертикальном положении — рис. 6, *б*. Единичное брутто-напряжение пересчитывалось по соотношению брутто- и нетто-площадей в нетто-напряжение и прикладывалось к нетто-площади. При этом оказалось достаточным рассмотреть ¼ часть объекта расчёта, приняв его нагружение симметричным. В расчёте вводились условия на плоскостях симметрии, а также ограничение перемещений расположенных с одной стороны боковых граней по нормали к плоскости сопряжения волокон.

а) б)

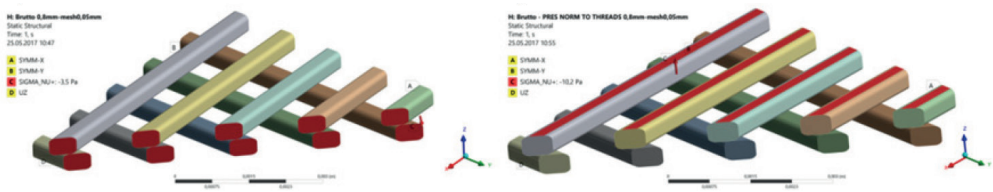


Рис. 6. Расчётная модель структуры заполнения для исследования адгезионной прочности:
а — нагружение в плоскости волокон; *б* — нагружение по нормали к волокнам

Изучение влияния характерного размера структуры ячеек на её механическую прочность производилось по схеме плоской деформации (рис. 7), не учитывающей волокнистую структуру образца и, соответственно, возможность нарушения адгезии волокон. В этом случае стенки воспринимают значительную долю нагрузки, а потому их учёт обязателен. Рассматривалась 1/2 рабочей части, нагруженная по торцу единичным брутто-напряжением (пересчитанным, как и в предыдущем случае, в нетто-напряжение) и закреплённая по противоположному торцу согласно условию симметрии и условию отсутствия перемещения образца по оси *y* как абсолютно твёрдого тела (в последнем случае принималось равным нулю перемещение *v* в начале координат, что, вообще говоря, создаёт краевой эффект). Таким образом, были рассмотрены только выращенные в горизонтальном положении образцы, нагружаемые в плоскости внутренней структуры ячеек.

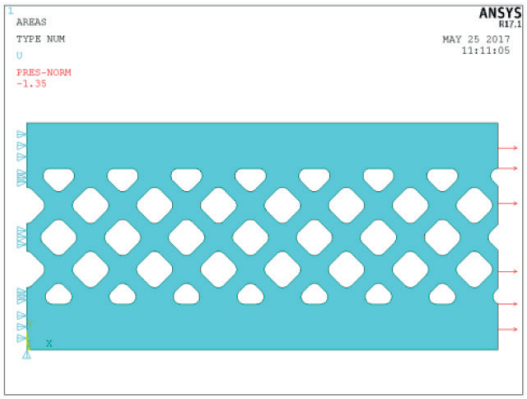


Рис. 7. Расчётная модель рабочей части образца для исследования механической прочности

И в том и в другом случае исследовалась концентрация вдали от зон проявления краевых эффектов. Последнее обстоятельство, в частности, позволяет отойти от строгости формулировки граничных условий. Характерные коэффициенты концентрации напряжений оценивались по эквивалентным напряжениям. Проведённые эксперименты показали, что материал хрупкий, а потому за эквивалентное принималось напряжение по гипотезе наибольших касательных.

Результаты (Results)

В таблице обобщены экспериментальные величины предела прочности полилактида в форме исходного материала, материала после переплавки, а также материала ячеистой структуры, получаемых методом 3D-печати изделий, с различной процентной плотностью заполнения внутреннего объёма.

Предел прочности полилактида (PLA) при растяжении

PLA	Исходный материал	Переплавленный материал			Ячеистая структура					
					растяжение в плоскости волокон			растяжение по нормали к волокнам		
	нить диаметром 1,75	волокно 120 × 0,4 × 0,25	лента 120 × 8 × 0,25	оболочка толщиной 1,2	плотность заполнения, %			плотность заполнения, %		
					20	50	80	20	50	80
$\sigma_в^+$, МПа	50,93 ±2,08	42,76 ±7,05	53,79 ±6,42	44,39 ±2,82	32,31 ±1,43	31,16 ±4,57	42,60 ±2,49	32,31 ±1,43	29,39 ±4,85	39,20 ±2,07

На рис. 8 и 9 представлены зависимости относительного (по отношению к нити диаметром 1,75) предела прочности с доверительным интервалом (эксперимент, рис. 8, *а*) и соответствующего ему характерного коэффициента концентрации напряжений α_σ (расчёт см. на рис. 8, *б*)

от плотности заполнения, для образцов, выращенных, соответственно, в горизонтальном и вертикальном положении, т. е. нагружаемых в плоскости внутренней структуры либо нормально к ней. В соответствии с отмеченными ранее закономерностями расчётные зависимости составлены из двух ветвей: *механической*, полученной расчётным способом по схеме плоской деформации при малом заполнении, и *адгезионной* — при большом.

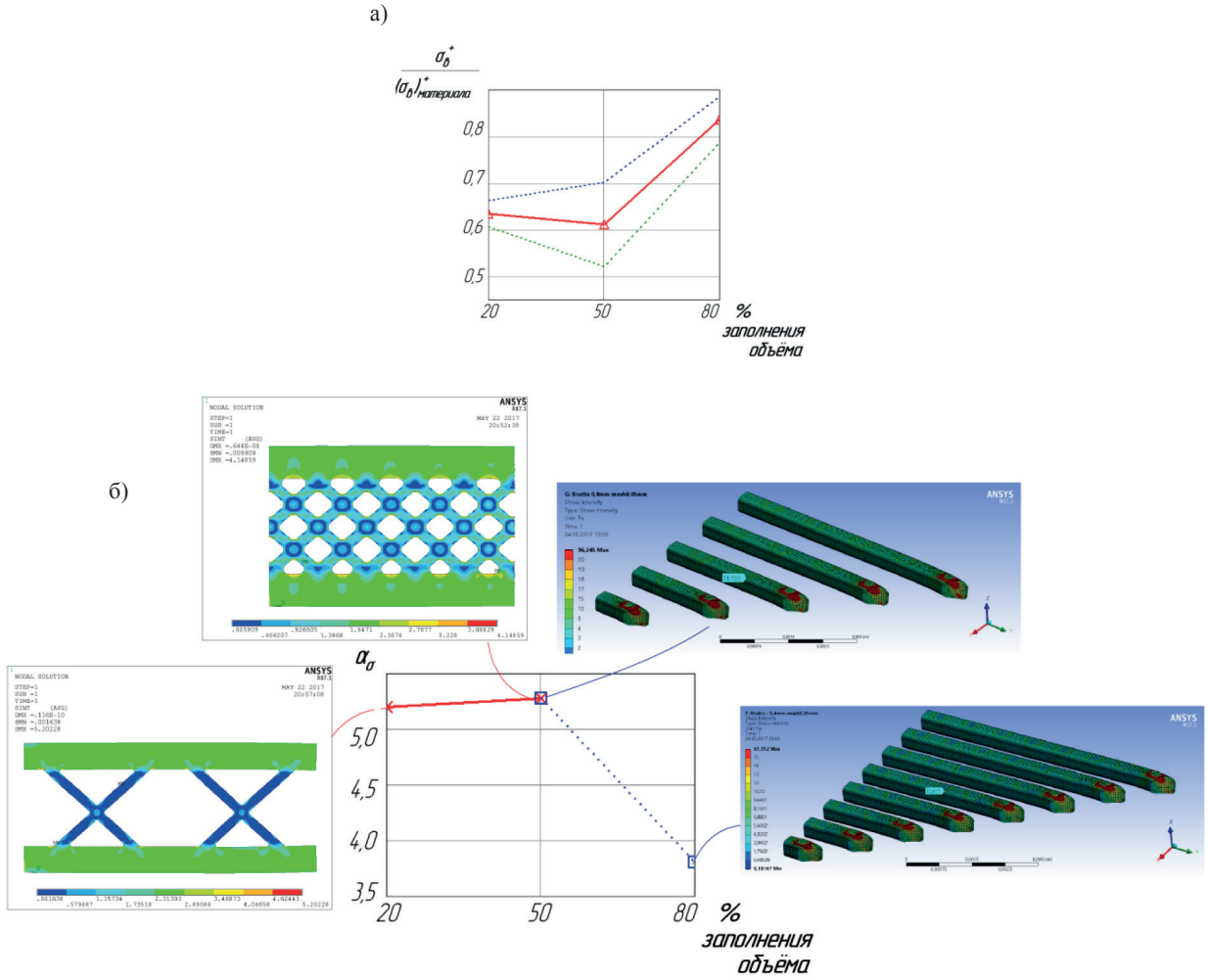


Рис. 8. Опытный (*а*) и расчётный (*б*) показатели прочности образцов, изготовленных горизонтально

Правая ветвь зависимости (см. рис. 8, *б*) масштабирована к левой ветви графика по центральному (при заполнении 50 %) значению α_σ, для масштабирования правой ветви зависимости (рис. 9, *б*) использован тот же множитель, поскольку левая ветвь по схеме плоской деформации не может быть получена.

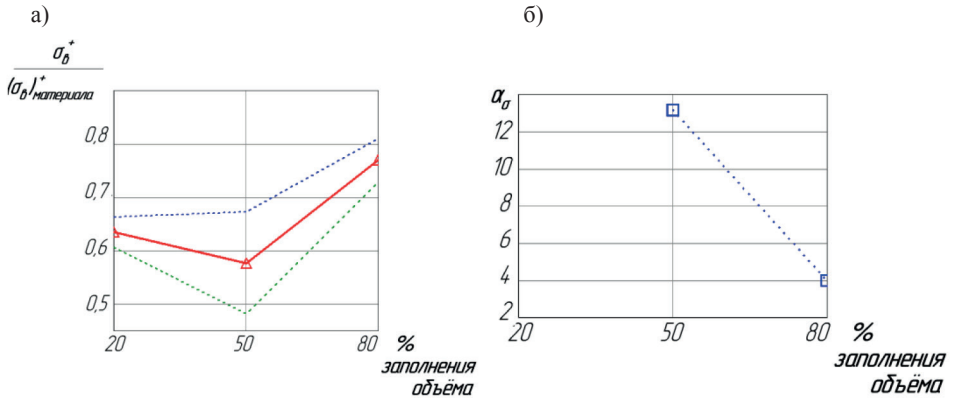


Рис. 9. Опытный (*а*) и расчётный (*б*) показатели прочности образцов, изготовленных вертикально

На рис. 10 – 11 показаны опытные диаграммы растяжения различных образцов в партии, на рис. 12 и 13 — характерные микрофотографии поверхности разрушения при той или иной плотности заполнения.

а) б) в)

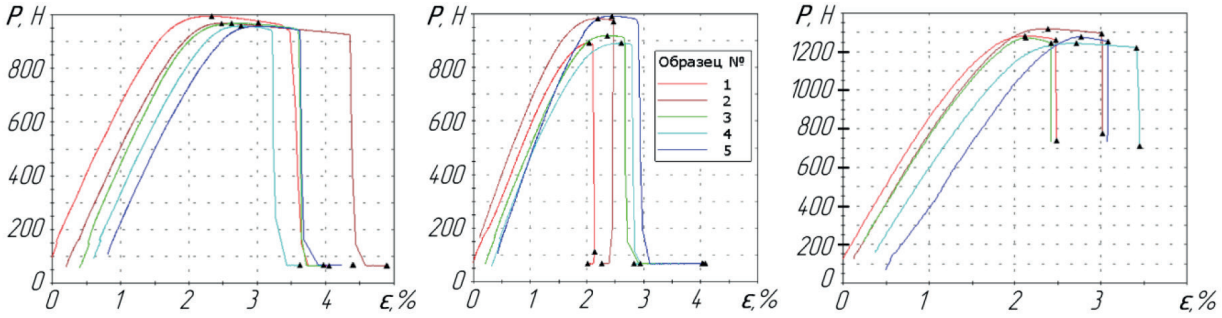


Рис. 10. Экспериментальные диаграммы растяжения образцов, изготовленных в горизонтальном положении, при различной плотности заполнения: *а* — 20 %; *б* — 50 %; *в* — 80 %

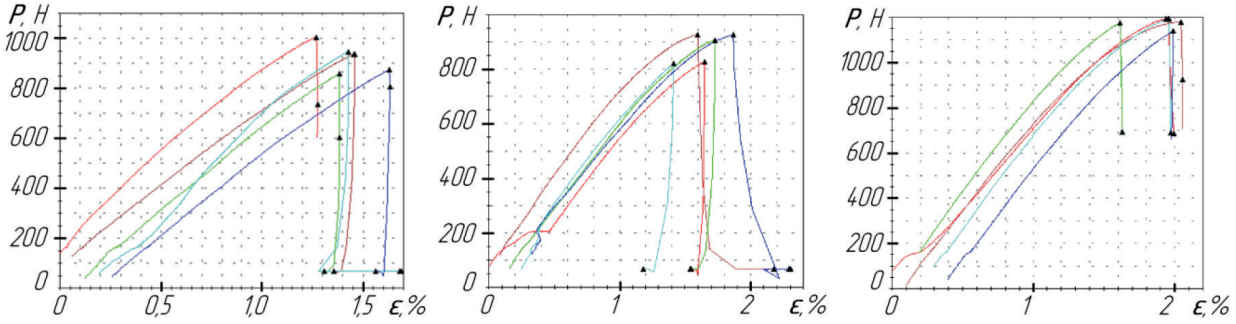


Рис. 11. Экспериментальные диаграммы растяжения образцов, изготовленных в вертикальном положении, при различной плотности заполнения: *а* — 20 %; *б* — 50 %; *в* — 80 %

а) б) в)

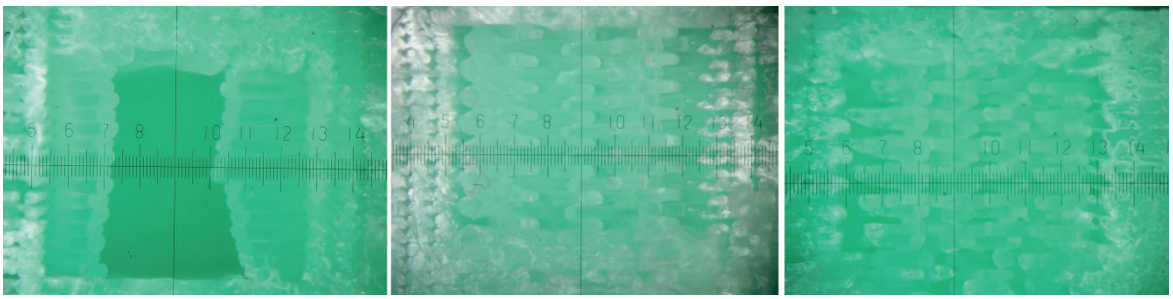


Рис. 12. Микрофотографии разрушенной поверхности образцов, изготовленных в горизонтальном положении: *а* — 20 %; *б* — 50 %; *в* — 80 %

а) б) в)

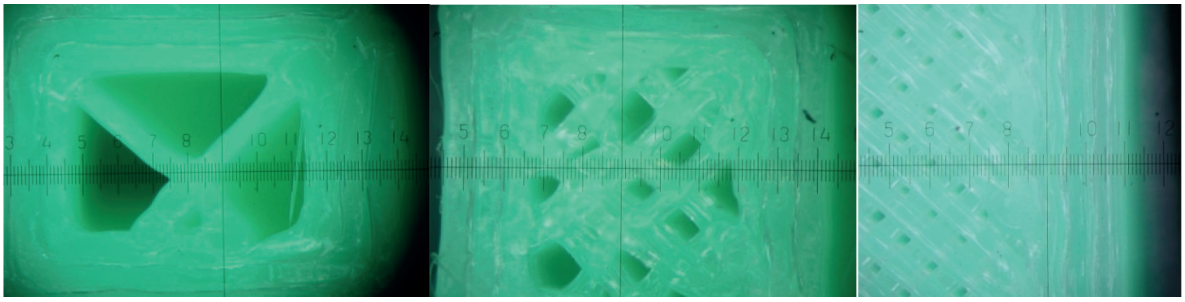


Рис. 13. Микрофотографии разрушенной поверхности образцов, изготовленных в вертикальном положении: *а* — 20 %; *б* — 50 %; *в* — 80 %

Обсуждение (Discussion)

Испытания показали примерно одинаковую прочность исходного и переплавленного материала. В последнем случае прочность отдельных волокон существенно лимитируется технологией их отделения от подложки — один из образцов показал прочность 50,66 МПа. Вопреки ожиданиям, монотонного повышения прочности с ростом плотности заполнения нет (см. рис. 8 и 9), отдельного рассмотрения требует наблюдаемое снижение прочности при близком к 50 % заполнении. Так или иначе, неувеличение прочности можно объяснить возрастанием числа концентраторов на единицу объёма, что помимо усиления их взаимодействия друг с другом повышает вероятность попадания дефектов материала в области концентрации.

Как эксперимент (сравнение рис. 8, *а* и рис. 9, *а*), так и расчёт (сравнение рис. 8, *б* и рис. 9, *б* соответственно) показывают, что адгезионная прочность ниже механической. Причём расчёт даёт существенно заниженные по сравнению с экспериментом предельные напряжения. Необходимо также учесть, что масштабный множитель для правой ветви зависимости рис. 8, *б* существенно меньше единицы, что, по всей видимости, объясняется неучётом адгезии со стенками и приближённостью схемы нагружения. Первый фактор является более существенным для нагружаемых нормально к плоскости волокон образцов, прочность которых лимитируется адгезией волокон. Действительно, при нагружении волокон в их плоскости разрушение образца происходит по механизму разрыва волокон (в прочности преобладает механическая составляющая), при нагружении нормально к плоскости — по механизму отрыва волокон друг от друга (превалирует адгезионная компонента). В последнем случае необеспечение адгезии отдельных волокон вследствие ошибки в работе управляющей программы может привести к разрушению детали (рис. 14).

а) б)

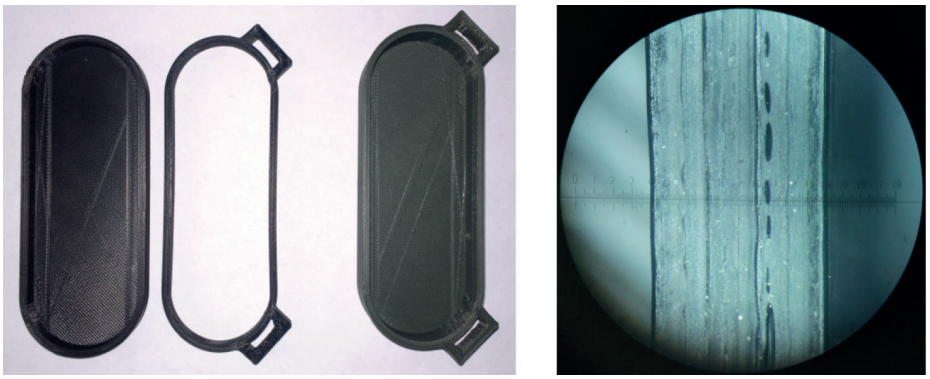


Рис. 14. Пример разрушения детали за счёт отрыва нитей по всему контуру:
а — разрушенная деталь рядом с аналогичной неразрушенной;
б — микрофотография поверхности разрушения

Заключение (Conclusion)

Проведённые исследования показали, что существенное влияние на прочность получаемых аддитивным способом изделий из ячеистых пластиков оказывают концентрация напряжений в углах ячеек и адгезия составляющих структуру волокон. При невысокой плотности заполнения, когда ячейки тонкостенные, прочность изделия лимитирует концентрация механических напряжений, при этом учёт каждого конкретного волокна в расчёте не обязателен. При большой плотности (большой степени сплошности, за меру которой можно принять отношение нетто- и брутто-площадей сечения) определяющее влияние на прочность изделия оказывает адгезия волокон. Линия разграничения приблизительно соответствует плотности заполнения 50 %, представляется возможным связать её с долей поверхностей сопряжения волокон в общей поверхности, проекция внешней нагрузки на которую отлична от нуля. Также представляется возможным ввести для расчёта ячеистой структуры понятие *физически бесконечно малого объёма* и определять феноменологические параметры через физико-механические либо адгезионные характеристики.

Прочность материала при переплавке снижается пластичность тонкой плёнки ленты толщиной 0,25 мм существенно выше, чем для нити исходного материала. Вопрос зависимости основных физико-механических характеристик получаемых аддитивно изделий из полилактида от скорости нагружения требует отдельного рассмотрения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Galeta T.* Influence of Structure on Mechanical Properties of 3D Printed Objects / T. Galeta, P. Raos, J. Stojšić, I. Pakši // Procedia Engineering. — 2016. — Vol. 149. — Pp. 100–104. DOI: 10.1016/j.proeng.2016.06.644.

2. *Galeta T.* Influence of Processing Factors on the Tensile Strength of 3D-printed Models / T. Galeta, I. Kladari, M. Karaka // Materials and technology. — 2013. — Vol. 47. — № 6. — Pp. 781–788.

3. *Impens D.* Assessing the Impact of Post-Processing Variables on Tensile and Compression Characteristics for 3D Printed Components / D. Impens, R. J. Urbanic // IFAC-PapersOnLine. — 2015. — Vol. 48. — Is. 3. — Pp. 652–657. DOI: 10.1016/j.ifacol.2015.06.156.

4. *Rankouhi B.* Failure Analysis and Mechanical Characterization of 3D Printed ABS With Respect to Layer Thickness and Orientation / B. Rankouhi, S. Javadpour, F. Delfanian, T. Letcher // Journal of FailureAnalysis and Prevention. — 2016. — Vol. 16. — Is. 3. — Pp. 467–481. DOI: 10.1007/s11668-016-0113-2.

5. *Torrado A. R.* Failure Analysis and Anisotropy Evaluation of 3D-Printed Tensile Test Specimens of Different Geometries and Print Raster Patterns / A. R. Torrado, D. A. Roberson // Journal of Failure Analysis and Prevention. — 2016. — Vol. 16. — Is. 1. — Pp. 154–164. DOI: 10.1007/s11668-016-0067-4.

6. *Torrado Perez A. R.* Fracture Surface Analysis of 3D-Printed Tensile Specimens of Novel ABS-Based Materials / A. R. Torrado Perez, D. A. Roberson, R. B. Wicker // Journal of Failure Analysis and Prevention. — 2014. — Vol. 14. — Is. 3. — Pp. 343–353. DOI: 10.1007/s11668-014-9803-9.

7. *Mohamed O. A.* Effect of Process Parameters on Dynamic Mechanical Performance of FDM PC/ABS Printed Parts Through Design of Experiment / O. A. Mohamed, S. H. Masood, J. L. Bhowmik, M. Nikzad, J. Azadmanjiri // Journal of Materials Engineering and Performance. — 2016. — Vol. 25. — Is. 7. — Pp. 2922–2935. DOI: 10.1007/s11665-016-2157-6.

8. *Wenzheng W.* Influence of Layer Thickness and Raster Angle on the Mechanical Properties of 3D-Printed PEEK and a Comparative Mechanical Study Between PEEK and ABS / W. Wenzheng, P. Geng, G. Li, D. Zhao, H. Zhang, J. Zhao // Materials. — 2015. — Vol. 8. — Is. 9. — Pp. 5834–5846. DOI: 10.3390/ma8095271.

9. *Christiyan K. G. J.* Flexural Properties of PLA Components Under Various Test Condition Manufactured by 3D Printer / K. G. J. Christiyan, U. Chandrasekhar, K. Venkateswarlu // Journal of The Institution of Engineers (India): Series C. — 2016. – Pp. 1–5. DOI: 10.1007/s40032-016-0344-8.

10. *Li D.* Interior structural optimization based on the density-variable shape modeling of 3D printed objects / D. Li, N. Dai, X. Jiang, X. Chen // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. — 2016. — Vol. 83. — Is. 9-12. — Pp. 1627–1635. DOI: 10.1007/s00170-015-7704-z.

REFERENCES

1. Galeta, Tomislav, P. Raos, J. Stojšić, and I. Pakši. “Influence of Structure on Mechanical Properties of 3D Printed Objects.” *Procedia Engineering* 149 (2016): 100–104. DOI: 10.1016/j.proeng.2016.06.644.

2. Galeta, Tomislav, I. Kladari, and M. Karaka. “Influence of Processing Factors on the Tensile Strength of 3D-printed Models.” *Materials and technology* 47.6 (2013): 781–788.

3. Impens, David, and R. J. Urbanic. “Assessing the Impact of Post-Processing Variables on Tensile and Compression Characteristics for 3D Printed Components.” *IFAC-PapersOnLine* 48.3 (2015): 652–657. DOI: 10.1016/j.ifacol.2015.06.156.

4. Rankouhi, B., S. Javadpour, F. Delfanian, and T. Letcher. “Failure Analysis and Mechanical Characterization of 3D Printed ABS With Respect to Layer Thickness and Orientation.” *Journal of Failure Analysis and Prevention* 16.3 (2016): 467–481. DOI: 10.1007/s11668-016-0113-2.

5. Torrado, Angel R., and David A. Roberson. “Failure Analysis and Anisotropy Evaluation of 3D-Printed Tensile Test Specimens of Different Geometries and Print Raster Patterns.” *Journal of Failure Analysis and Prevention* 16.1 (2016): 154–164. DOI: 10.1007/s11668-016-0067-4.

6. Torrado Perez, Angel R., David A. Roberson, and Ryan B. Wicker. "Fracture Surface Analysis of 3D-Printed Tensile Specimens of Novel ABS-Based Materials." *Journal of Failure Analysis and Prevention* 14.3 (2014): 343–353. DOI: 10.1007/s11668-014-9803-9.

7. Mohamed, Omar Ahmed, Syed Hasan Masood, Jahar Lal Bhowmik, Mostafa Nikzad, and Jalal Azadmanjiri. "Effect of Process Parameters on Dynamic Mechanical Performance of FDM PC/ABS Printed Parts Through Design of Experiment." *Journal of Materials Engineering and Performance* 25.7 (2016): 2922–2935. DOI: 10.1007/s11665-016-2157-6.

8. Wu, Wenzheng, Peng Geng, Guiwei Li, Di Zhao, Haibo Zhang, and Ji Zhao. "Influence of Layer Thickness and Raster Angle on the Mechanical Properties of 3D-Printed PEEK and a Comparative Mechanical Study Between PEEK and ABS." *Materials* 8.9 (2015): 5834–5846. DOI: 10.3390/ma8095271.

9. Christiyan, K. G. Jaya, U. Chandrasekhar, and K. Venkateswarlu. "Flexural Properties of PLA Components Under Various Test Condition Manufactured by 3D Printer." *Journal of The Institution of Engineers (India): Series C* (2016): 1–5. DOI: 10.1007/s40032-016-0344-8.

10. Li, Dawei, Ning Dai, Xiaotong Jiang, and Xiaosheng Chen. "Interior structural optimization based on the density-variable shape modeling of 3D printed objects." *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 83.9-12 (2016): 1627–1635. DOI: 10.1007/s00170-015-7704-z.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Петров Владимир Маркович —
доктор технических наук, профессор
ФГБОУ ВО «СПбГАСУ»
190005, Российская Федерация,
г. Санкт-Петербург,
ул. 2-я Красноармейская, 4
e-mail: *tehmeh@spbgasu.ru*

Безпальчук Сергей Николаевич —
заведующий межкафедральной лабораторией,
директор испытательного центра
ФГБОУ ВО «СПбГАСУ»
190005, Российская Федерация,
г. Санкт-Петербург,
ул. 2-я Красноармейская, 4
e-mail: *ua1aes@mail.ru*

Яковлев Сергей Павлович — аспирант
Научный руководитель:
Иванов Константин Михайлович —
доктор технических наук, профессор
ФГБОУ ВО «БГТУ «ВОЕНМЕХ»
им. Д.Ф. Устинова»
190005, Российская Федерация, г. Санкт-Петербург,
ул. 1-я Красноармейская, 1
e-mail: *yakovlev_sp@mail.ru*

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

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: *tehmeh@spbgasu.ru*

Bezpal'chuk, Sergey N. —
Inter-departmental Laboratory Head,
Testing Center Head
Saint-Petersburg State University of Architecture
and Civil Engineering
4 2nd Krasnoarmeyskaya Str., St. Petersburg, 190005,
Russian Federation
e-mail: *ua1aes@mail.ru*

Yakovlev, Sergey P. — Postgraduate
Supervisor:
Ivanov, Konstantin M. —
Dr. of Technical Sciences, professor
Baltic state technical university «VOENMEH»
named after D.F. Ustinov
1 1st Krasnoarmeyskaya Str., St. Petersburg, 190005,
Russian Federation
e-mail: *yakovlev_sp@mail.ru*

Статья поступила в редакцию 15 июля 2017 г.
Received: July 15, 2017.

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

DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-4-777-785

MEASUREMENT ERRORS IN SHIP REPAIR AND ESTIMATION OF MOMENTS OF SELECTIVE DISTRIBUTION

V. A. Kulikov

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

Analysis of multiple measurements reveals effects that attract attention and require additional research due to their importance for assessing the reliability of quality control of manufacturing parts in shipbuilding, ship repair and industrial products in general. Rounding the observed readings to integer scale divisions transforms the continuous distribution of random measurement results into a discrete distribution. By the method of integral transformations of the discrete function of the distribution of a random variable into a characteristic function, the effect of the scale division on the estimates of the moments of the entire population of the distribution is investigated, and thus the condition for introducing corrections is formulated — an unlimited sample size.

There is a significant discrepancy between the measurement error calculated by the standard and the determination of the confidence limit of the error. It proposed and theoretically proved solution which is in the standard GOST P ISO 5725-1-2002 (ISO 5725) is denoted as a statistical problem - evaluation confidence limits of measurement error. The confidence limit of the random measurement error should be determined by doubling the calculated error value with the possible excess of it over the true (theoretical) value. The excess value is characterized by a confidence probability determined by the integral distribution curve calculated by ch2-distribution. Calculated and plotted cumulative distribution curves exceeding the guaranteed confidence limit error of measurement over the true value for the sample volume n = 5 u and n = 20. The result obtained theoretically agrees with the result of computer modeling, set forth in a published literature source

The work may be of interest for metrological services, teachers and specialists in the processing of measurement results.

Keywords: discrete distribution, characteristic function, parameters, samples, measurement errors, confidence limit, confidence probability.

For citation:
Kulikov, Valentin A. "Measurement errors in ship repair and estimation of moments of selective distribution". *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 9.4 (2017): 777–785. DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-4-777-785.

УДК 631.717

ПОГРЕШНОСТИ ИЗМЕРЕНИЙ В СУДОРЕМОНТЕ И ОЦЕНКА МОМЕНТОВ ВЫБОРОЧНЫХ РАСПРЕДЕЛЕНИЙ

В. А. Куликов

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

Анализ многократных измерений выявляет эффекты, привлекающие к себе внимание и требующие дополнительного исследования вследствие их значимости для оценки достоверности контроля качества деталей в судостроении, судоремонте и промышленной продукции в целом. Округление наблюдаемых показаний до целых делений шкалы преобразует непрерывное распределение случайных результатов измерения в дискретное распределение. Методом интегральных преобразований дискретной функции распределения случайной величины в характеристическую функцию исследовано влияние цены деления шкалы на оценки моментов всей совокупности распределения, тем самым сформулировано условие внесения поправок — неограниченность объема выборок.

Обнаружено значительное несоответствие рассчитываемой по стандарту погрешности измерения определению доверительной границы погрешности. Предложено и теоретически обосновано решение задачи, которая в стандарте ГОСТ Р ИСО 5725-1-2002 (ISO 5725) обозначена как статистическая

проблема — оценка доверительных границ погрешности измерения. Доверительная граница случайной погрешности измерения должна определяться удвоением расчетного значения погрешности с возможным превышением ее над истинным (теоретическим) значением. Значение превышения характеризуется доверительной вероятностью, определяемой по кривой интегрального распределения, рассчитываемой по ch2-распределению. Рассчитаны и построены кривые интегрального распределения гарантированного превышения доверительной границы погрешности измерения над истинным значением для выборок объема n = 5 и n = 20. Полученный теоретически результат согласуется с результатом компьютерного моделирования.

Работа может представлять интерес для метрологических служб, преподавателей и специалистов по обработке результатов измерений.

Ключевые слова: дискретное распределение, характеристическая функция, параметры, выборки, погрешность измерения, доверительные границы, доверительные вероятности.

Для цитирования:
Куликов В. А. Погрешности измерений в судоремонте и оценка моментов выборочных распределений / В. А. Куликов // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2017. — Т. 9. — № 4. — С. 777–785. DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-4-777-785.

Введение

Достоверность контроля качества промышленной продукции, в том числе продукции судоремонтного производства, представляет собой проблему, само существование которой обусловлено неизбежными погрешностями измерения при контроле. Показатели достоверности контроля определяются погрешностью измерения контролируемых параметров продукции. Актуальность задачи объективной оценки погрешности измерений очевидна, и эта задача решается по различным направлениям [1] – [4]. Однако при решении этой задачи возникают определенные проблемы [5] – [7]. Особую сложность представляет собой задача оценки моментов выборочных распределений и оценка на этой основе случайной составляющей погрешности измерения. Необходимость достоверной оценки погрешности измерения делает актуальным учет всех факторов, которые могут оказывать влияние на погрешность измерения. К таким факторам относятся шкала средства измерения и представления о закономерностях формирования выборочного распределения при многократных измерениях.

Отсчетные устройства средств измерений в виде шкалы с указателем или цифрового устройства являются первым определяющим фактором для погрешности средства измерения и погрешности измерения в целом. Значимость цены деления шкалы или единицы наименьшего разряда цифрового показания средства измерения для точности измерений очевидна, поскольку связь между ними прямая и явная. И, возможно, по этой причине исследований влияния цены деления шкалы на результаты измерений немного. Однако кажущаяся простота вопроса не соответствует действительности. На сложность вопроса указывал Ф. В. Цидулко в 1981 г. [8]. С того времени мало что изменилось.

Есть две стороны вопроса: цена деления и погрешность показания средства измерения — первая; цена деления и случайность показаний при многократных измерениях — вторая.

Первая часть вопроса ясна. Теоретически

$$\frac{1}{2}\Delta E \le \Delta_p,$$

где $\frac{1}{2}\Delta x$ — неизбежная погрешность округления показания; Δx — цена деления шкалы; Δ_p — предельная погрешность средства измерения.

На практике в комплексе нормируемых метрологических характеристик цена деления шкалы и предельная погрешность приборов приводятся раздельно, но соотношение между ними даже более определенно — приведенное неравенство можно по факту заменить равенством. Сама по себе в однократном измерении погрешность округления мало что значит, но представляет интерес исследование вопроса о влиянии ошибки округления на оценки моментов распределений при многократных измерениях.

Вторая часть вопроса изучена недостаточно. При многократных измерениях случайных величин точность измерения определяется достоверностью описания функции распределения измеряемой величины моментами распределения, рассчитываемыми по результатам измерений с погрешностью округления до целых делений шкалы. Происходит преобразование непрерывного распределения случайной величины в дискретное распределение, характеристики которого определяются ценой деления шкалы средства измерения.

Аналогичная задача решается при обработке больших по объему выборок в статистике — при так называемом *группировании данных* [9], где также имеет место округление данных в пределах классового интервала длиной ΔX. Для компенсации группирования (округления) данных применяются известные поправки Шеппарда, которые принято распространять и на обработку результатов измерения [10]. Например, «…средняя ошибка округления $\Delta X/2$… воздействует обычно на s^2 только как $(\Delta X)^2/12$», т. е. крайне незначительно. Поэтому в нормативных документах при обработке результатов измерений эти поправки обычно не применяют.

Более глубокое и корректное исследование того же вопроса было выполнено с использованием интегральных преобразований функции распределения (ФР) в характеристическую функцию (ХФ) [9]. В этом источнике указывается, что оценки моментов совпадают с истинными значениями, когда характеристическая функция $\chi_x(q)$ функции распределения измеряемой случайной величины равна нулю, т. е. когда

$$\chi_x(q) = 0 \text{ при } q \geq \left(\frac{2\pi}{\Delta x} - \varepsilon\right),\ \varepsilon > 0.$$

Здесь q — действительная переменная со значениями от $-\infty$ до $+\infty$, нули ХФ могут быть получены при любом Δx, и при любом Δx найдется такое q, которое удовлетворяет приведенному неравенству.

Указанных условий для получения истинных значений моментов явно недостаточно. Все определяет соотношение Δx и среднеквадратического отклонения ФР σ. Только при $\Delta x < 2\sigma$ можно говорить о совпадении оценок моментов, и эти оценки приводятся. Но в практике измерений это соотношение остается неизвестным. Тем не менее, для полноты картины представляет интерес получение оценок моментов при $\Delta x \geq 2\sigma$ и это первая задача следующего далее аналитического исследования.

Методы и материалы

Для распределения случайных погрешностей измерений наиболее характерным является *закон нормального распределения*. В результате измерений с округлением показаний до целых делений шкалы образуется дискретное (решетчатое) распределение с точками разрыва x_i в отметках шкалы. Для получения оценок моментов необходимо исследовать характеристическую функцию дискретного выборочного распределения.

На первом этапе исследования примем объем выборки достаточно большим, когда получаемые данные заполняют всю зону рассеяния случайной величины, как это бывает при группировании данных. Характеристическая функция дискретного распределения в общем случае имеет вид [9]:

$$\chi_x(q) = \sum_x e^{iqx} p(x),$$

где e^{iqx} — показательная функция комплексного переменного; q — действительная переменная, изменяющаяся от $-\infty$ до $+\infty$; x — случайная величина (в нашем случае результат измерения, принимающий значения, соответствующие целым делениям шкалы прибора); $p(x)$ — вероятность некоторого значения величины x.

Построим характеристическую функцию для дискретного распределения, возникающего при измерении случайной величины, распределенной по нормальному закону с математическим ожиданием $\xi = 0$ и среднеквадратическим отклонением $\sigma = 1$. Допустим (полагаем), что математи-

ческому ожиданию соответствует середина шкалы и эта точка служит началом отсчета в долях σ. Тогда в спектре дискретных значений x_i получим два ряда чисел, равных по модулю и обратных по знаку, соответствующих отметкам шкалы. При этом вследствие симметричности дифференциальной функции нормального распределения будем иметь

$$p(+x_i) = p(-x_i) = \int_{x_i-0{,}5\Delta x}^{x_i+0{,}5\Delta x} \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{x^2}} dx.$$

Тогда характеристическая функция дискретного распределения принимает вид

$$\chi_x(q) = \sum_{x_i} e^{iqx_i} p(x_i) + \sum_{-x_i} e^{-iqx_i} p(-x_i) = \sum_{x_i} \left(e^{iqx_i} + e^{-iqx_i}\right) p(x_i).$$

Разложением в степенные ряды несложно показать, что

$$\left(e^{iqx_i} + e^{-iqx_i}\right) = 2\cos qx_i.$$

Поэтому

$$\chi_x(q) = \sum_{x_i} p(x_i) 2\cos qx_i$$

Фиксация $\chi_x(q) = \text{const}$ делает ХФ зависимой от qx_i, которое должно принимать определенные значения в зависимости от значения $\chi_x(q)$.

При $\chi_x(q) = 0$

$$qx_i = \frac{\pi}{2} k,\ k = 1,\ 3,\ 5,\ ...,$$

где k = 1 в первой, k = 3 во второй, k = 5 в третьей относительно центра группирования отметках шкалы и т. д.

Отсюда получаем:

$$q = f(x_1) = \frac{\pi}{2} \cdot \frac{1}{x_1};$$

$$\Delta x = \frac{\pi}{q} = 2x_1.$$

И обратно:

$$x_1 = \frac{1}{2}\Delta x.$$

Тогда для значений x_i в отметках шкалы получаем:

– при $\Delta x = 1\sigma$ и $q = \pi$ $\quad x_1 = 0{,}5;\ \ x_2 = 1{,}5;\ \ x_3 = 2{,}5$ ...;

– при $\Delta x = 2\sigma$ и $q = \frac{\pi}{2}$ $\quad x_1 = 1{,}0;\ x_2 = 3{,}0;\ x_3 = 5{,}0$ ...;

– при $\Delta x = 3\sigma$ и $q = \frac{\pi}{3}$ $\quad x_1 = 1{,}5;\ x_2 = 4{,}5;\ x_3 = 7{,}5$ ...,

что соответствует приведенному ранее условию $q \geq \frac{2\pi}{\Delta x} - \varepsilon$ при некотором ε, но, как показано далее, не всегда гарантирует совпадение оценок моментов.

Найдем оценки моментов дискретного распределения, получаемого при измерении по шкале с ценой деления $\Delta x = 3\sigma$, где σ = 1 — по условию.

Начальный момент первого порядка определяется по выражению

$$\alpha_1 = i^{-1}\chi_x^{(1)}(0) = \xi,$$

где $\chi_x^{(1)}(0)$ — производная первого порядка ХФ при q = 0; ξ — математическое ожидание дискретной ФР.

Центральный момент второго порядка определяется по выражению

$$\mu_2 = \sigma^2 = \alpha_2 - \xi^2,$$

где α_2 — начальный момент второго порядка ФР; $\alpha_2 = i^{-2}\chi_x^{(2)}(0)$, где $\chi_x^{(2)}(0)$ — производная второго порядка ХФ при $q = 0$.

Из $\chi_x(q) = \sum_{x_i} p(x_i) 2\cos qx_i$ получаем:

$$\chi_x^{(1)}(q) = 2\left[p(x_1)(-\sin qx_1)x_1 + p(x_2)(-\sin qx_2)x_2 + ...\right];$$

$$\chi_x^{(2)}(q) = 2\left\{p(x_1)\left[\cos(qx_1 + \pi)\right]x_1^2 + p(x_2)\left[\cos(qx_2 + \pi)\right]x_2^2 + ...\right\};$$

$$p(x_1 = 1{,}5) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}}\int_0^3 e^{-\frac{x^2}{2}}dx = 0{,}49865.$$

При $q = 0$ и вследствие малости $p(x_2{=}4{,}5)$:

$$\chi_x^{(1)}(0) = 0;$$

$$\chi_x^{(2)}(0) = -2{,}24392.$$

После подстановок получаем:

$$\alpha_1 = \xi = 0;$$

$$\mu_2 = \sigma^2 = 2{,}24392.$$

Аналогичные расчеты моментов при $\Delta x = 1\sigma$ и при $\Delta x = 2\sigma$ дают результаты, приведенные далее в таблице.

Результаты

Значения моментов дискретного распределения

Δx	$-\frac{(\Delta x)^2}{12}$	Dx	μ_2	μ'_2
3σ	0,75	1,0	2,24	1,49
2σ	0,33	1,0	1,35	1,02
1σ	0,08	1,0	1,06	0,98

Примечания: Dx — истинное значение момента для непрерывного распределения; μ_2 — значение момента для дискретного распределения; μ'_2 — значение момента с поправкой

Обозначим далее ε — расчетная случайная погрешность измерения.

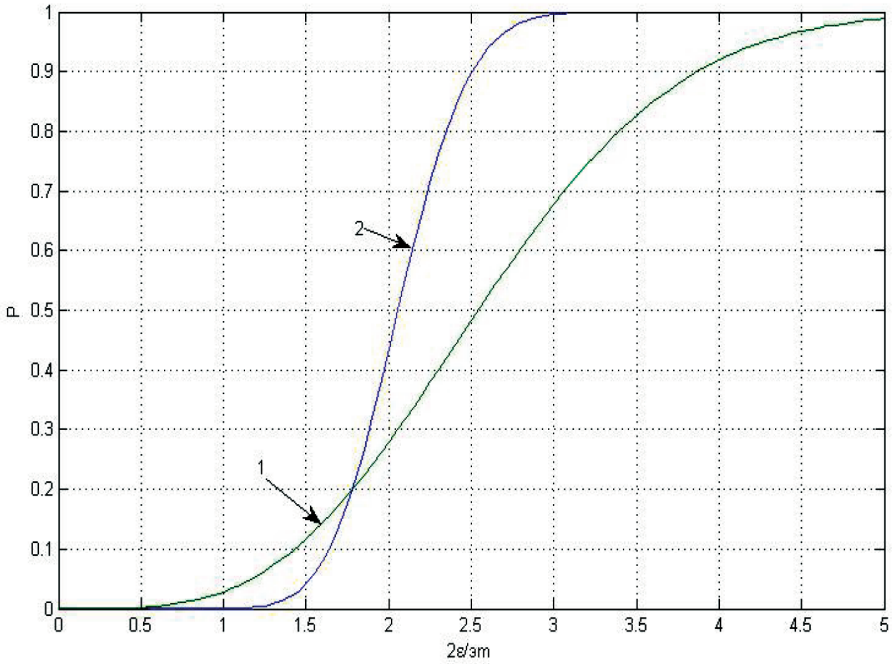
Для выборки объема n с доверительной вероятностью P получим [11]

$$\varepsilon = t_k(P)\cdot s(\bar{x}),$$

где $s(\bar{x})$ — выборочное среднеквадратическое отклонение оценки измеряемой величины $\bar{x}$; $t_k(P)$ — случайная величина, распределенная по закону Стьюдента при числе степеней свободы $k = (n - 1)$ и доверительной вероятности P.

Теоретически для случайных величин, распределенных по нормальному закону с параметрами (0, 1), эталонное (истинное) значение погрешности $\varepsilon_{эт}$ измерения определяется как квантиль распределения среднеарифметического $\bar{x}$. Например, при $P = 0{,}95$ для выборки объема $n = 5$ $\varepsilon_{эт} = 0{,}9$; для выборки объема $n = 20$ $\varepsilon_{эт} = 0{,}45$. Однако случайность $s(\bar{x})$ делает границы расчетной погрешности также случайными [12] – [17]. При симметричных распределениях измеряемой величины около половины расчетных значений погрешности измерения оказываются несоответствующими определению доверительной границы [18]. Поэтому представляет интерес задача нахождения закона распределения удвоенного значения погрешности измерения в виде 2ε. Эта вторая задача настоящего исследования решается теоретически с использованием χ^2-распределения с учетом того, что [19] $\frac{n-1}{\sigma^2}s^2(x)$ соответствует χ^2-распределению с $(n - 1)$ степенями свободы.

Результаты представлены на графике в виде выборочного интегрального распределения 2ε/эт, где эт — эталонное значение погрешности $\varepsilon_{эт}$.



Интегральное распределение $2\varepsilon/\varepsilon_{эт}$ для выборок объема $n = 5$ (кривая *1*) и $n = 20$ (кривая *2*)

Обсуждение

Из данных таблицы следует, что погрешность округления оказывает значительное влияние на оценку второго центрального момента, особенно при $\Delta x \geq 2\sigma$. Внесение поправки не гарантирует компенсации ошибки округления из-за неопределенности соотношения Δx и σ. При недостаточной разрешающей способности шкалы внесение поправки может привести к абсурдному результату — оценка момента распределения может оказаться отрицательной, но и это даже не главное. Приведенный детальный анализ применен для группирования данных, воспроизводящих всю теоретическую совокупность распределения. При всей схожести процессов округления при группировании данных и при измерениях есть одно существенное различие, состоящее в в объеме обрабатываемых данных. При измерениях реализуется случайная выборка всегда ограниченного объема, поэтому нет оснований распространять заключение о степени влияния классового интервала на оценки моментов при группировании данных на область измерений.

В практике измерений при ограниченном объеме выборки прежде всего необходимо обратить внимание на явление наблюдаемости распределения, по отношению к которому формулируется расширенное понятие *разрешающей способности шкалы*, только одним из аспектов которого является цена деления [20]. Правильность оценки моментов распределения определяет доверительные границы погрешности измерения и цена деления шкалы здесь не единственный влияющий фактор.

Из приведенного графика следует, что для выборок объема $n = 5$ доверительная граница погрешности измерения может быть получена удвоением расчетного значения погрешности в виде 2ε. Вероятность того, что $2\varepsilon < \varepsilon_{эт}$, составляет 0,028. Вероятность того, что $\varepsilon_{эт} \leq 2\varepsilon \leq 5\varepsilon_{эт}$, составляет 0,96. Вероятность того, что $2\varepsilon \leq 2{,}5\varepsilon_{эт}$, составляет 0,5. Аналогичные оценки для выборок объема $n = 20$ следуют из кривой *2*. И это остается справедливым для всех выборок того же объема, выполненных в условиях воспроизводимости или, по крайней мере, в условиях повторяемости.

Таким образом, расчетное значение погрешности ε — случайная величина, 2ε — доверительная граница погрешности, для которой случайным становится превышение над истинным значением с известным найденным интегральным распределением. В соответствии с представлениями

о качестве измерений [21] такой результат измерения следует признать случайным, но правильным. Мерой правильности является превышение доверительной границы погрешности измерения над истинным значением, оцениваемое по доверительной вероятности. Полученные теоретически результаты непротиворечиво воспроизводятся компьютерным моделированием многократных измерений [18], [22] при достаточной разрешающей способности шкалы цифровой модели.

Заключение

Таким образом, практически значимые результаты теоретического исследования сводятся к следующему:

– цена деления шкалы оказывает значительное влияние на оценки моментов распределения измеряемой случайной величины и, следовательно, на оценку погрешности измерения;

– расчетная погрешность измерения не соответствует определению доверительной границы погрешности измерения;

– доверительная граница погрешности может и должна определяться по χ^2-распределению.

– для выборок объемом $n = 5$ и $n = 20$ рассчитаны интегральные функции распределения доверительной границы погрешности измерения, которая определяется как удвоенное значение расчетной погрешности.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Солопченко Г. Н.* Области эффективного применения статистических методов обработки многократных измерений / Г. Н. Солопченко // Измерительная техника. — 2016. — № 5. — С. 20–26.

2. *Назаров Н. Г.* Оценка качества партии однородной продукции при использовании случайной однократной выборки с учетом степени риска / Н. Г. Назаров, М. В. Зеленкова // Метрология. — 2014. — № 6. — С. 13–21.

3. *Боцюра О. А.* Влияние закона распределения показаний средств измерений на точность оценок неопределённости измерений / О. А. Боцюра, И. П. Захаров // Метрология. — 2016. — № 3. — С. 12–18.

4. *E Vascouncellos Renata T. B.* Error analysis in high-accuracy digital measurements / R. T. B. e Vascouncellos, M. L. R. de Campos // Measurement. — 2012. — Vol. 45. — Is. 5. — Pp. 881–888. DOI: 10.1016/j.measurement.2012.02.008.

5. ГОСТ Р ИСО 5725-1-2002. Точность (правильность и прецизионность) методов и результатов измерений. Ч. 1. Основные положения и определения. — М.: Изд-во стандартов, 2002. — 24 с.

6. *Рабинович С. Г.* О необходимости создания новых рекомендаций по оцениванию погрешностей и неопределенностей измерений / С. Г. Рабинович // Системи обробки інформації. — 2010. — № 4. — С. 23–26.

7. *Ye X.* The new concepts of measurement error theory / X. Ye, X. Xiao, J. Shi, M. Ling // Measurement. — 2016. — Vol. 83. — Pp. 96–105. DOI: 10.1016/j.measurement.2016.01.038.

8. *Иванов О. А.* Общие методы и средства линейно-угловых измерений: учеб. пособие / О. А. Иванов, [и др.]; под ред. Ф. В. Цидулко. — М.: Изд-во стандартов, 1981. — 216 с.

9. *Корн Г.* Справочник по математике / Г. Корн, Т. Корн. — М.: Наука, 1974. — 832 с.

10. *Бурдун Г. Д.* Основы метрологии: учеб. пособие / Г. Д. Бурдун, Б. Н. Марков. — М.: Изд-во стандартов, 1972. — 312 с.

11. ГОСТ Р 8.736-2011. Государственная система обеспечения единства измерений. Измерения прямые многократные. Методы обработки результатов измерений. Основные положения. — М.: Стандартинформ, 2013. — 20 с.

12. *Фридман А. Э.* Основы метрологии. Современный курс / А. Э. Фридман. — СПб.: Изд-во НПО «Профессионал», 2008. — 284 с.

13. *Плуталов В. Н.* Метрология и техническое регулирование: учеб. пособие / В. Н. Плуталов. — М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2011. — 415 с.

14. *Гармаш А. В.* Метрологические основы аналитической химии / А. В. Гармаш, Н. М. Сорокина. — М.: МГУ им. М. В. Ломоносова, 2005. — 34 с.

15. *Яворский В. А.* Планирование научного эксперимента и обработка экспериментальных данных / В. А. Яворский. — М.: Изд-во МФТИ, 2006. — 24 с.

16. *Сергеев А.* Метрология, стандартизация, сертификация / А. Сергеев, В. Терегеря. — М.: Юрайт-Издат, 2013. — 820 с.

17. *Орлов А. И.* Вероятность и прикладная статистика: основные факты / А. И. Орлов. — М.: КНОРУС, 2016. — 192 с.

18. *Куликов В. А.* Моделирование программными средствами случайных погрешностей измерения в судостроении / В. А. Куликов // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2015. — № 5 (33). — С. 110–118.

19. *Брандт З.* Статистические методы анализа наблюдений / З. Брандт. — М.: Мир, 1975. —312 с.

20. Куликов В. А. Цена деления и разрешающая способность шкалы / В. А. Куликов, А. В. Куликов // Известия высших учебных заведений. Приборостроение. — 2013. — Т. 56. — № 3. — С. 44–47.

21. *Шишкин И. Ф.* Теоретическая метрология: в 2 ч. / И. Ф. Шишкин. — Питер, 2010. — Ч. 1. Общая теория измерений. — 192 с.

22. *Куликов В.* Очерки по теории измерений. Анализ и компьютерное моделирование / В. Куликов. — LAP Lambert Academic Publishing, 2017. — 108 с. ISBN: 978-3-330-06928-2.

REFERENCES

1. Solopchenko, G.N. “Oblasti effektivnogo primeneniya statisticheskikh metodov obrabotki mnogokratnykh izmerenii.” *Izmeritel’naya tekhnika* 5 (2016): 20–26.

2. Nazarov, N. G., and M. V. Zelenkova. “Otsenka kachestva partii odnorodnoi produktsii pri ispol’zovanii sluchainoi odnokratnoi vyborki s uchetom stepeni riska.” *Metrologiya* 6 (2014): 13–21.

3. Botsyura, O. A., and I. P. Zakharov. “Vliyanie zakona raspredeleniya pokazanii sredstv izmerinii na tochnost’ otsenok neopredelennosti izmerenii.” *Metrologiya* 3 (2016): 12–18.

4. e Vasconcellos, Renata T. Barros, and Marcello LR de Campos. “Error analysis in high-accuracy digital measurements.” *Measurement* 45.5 (2012): 881–888. DOI: 10.1016/j.measurement.2012.02.008.

5. Russian Federation. State Standard GOST R ISO 5725-1-2002. Accuracy (trueness and precision) of measurement methods and results. Part 1. General principles and definitions. M.: IPK Izdatel’stvo standartov, 2002.

6. Rabinovich, S. G. “O neobkhodimosti sozdaniya novykh rekomendatsii po otsenivaniyu pogreshnostei i neopredelennostei izmerenii.” *Sistemi obrobki informatsiї* 4 (2010): 23–26.

7. Ye, Xiaoming, Xuebin Xiao, Junbo Shi, and Mo Ling. “The new concepts of measurement error theory.” *Measurement* 83 (2016): 96–105. DOI: 10.1016/j.measurement.2016.01.038.

8. Ivanov, O. A., et al. *Obshchie metody i sredstva lineino-uglovykh izmerenii: Uchebnoe posobie.* Edited by F.V.Tsidulko. M.: Izd-vo standartov, 1981.

9. Korn, G., and T. Korn. *Spravochnik po matematike*. M.: Nauka, 1974.

10. Burdun, G. D., and B. N. Markov. *Osnovy metrologii. Uchebnoe posobie dlya vuzov.* M.: Izdatel’stvo standartov, 1972.

11. Russian Federation. State Standard GOST R 8.736-2011. State system for ensuring the uniformity of measurements. Multiple Direct measurements. Methods of measurement results processing. Main positions. M.: Standartinform, 2013.

12. Fridman, A. E. *Osnovy metrologii. Sovremennyi kurs*. SPb.: NPO ”Professional”, 2008.

13. Plutalov, V. N. *Metrologiya i tekhnicheskoe regulirovanie: ucheb. posobie dlya vuzov*. M.: Izd-vo MGTU im. N. E. Baumana, 2011.

14. Garmash, A. V., and N.M. Sorokina. *Metrologicheskie osnovy analiticheskoi khimii*. M.: Moskovskii gosudarstvennyi universitet im. M. V Lomonosova, 2005.

15. Yavorskii, V. A. *Planirovanie nauchnogo eksperimenta i obrabotka eksperimental’nykh dannykh*. M.: MFTI, 2006.

16. Sergeev, A., and V. Teregerya. *Metrologiya, standartizatsiya, sertifikatsiya*. Yurait-Izdat, 2013.

17. Orlov, A.I. *Veroyatnost’ i prikladnaya statistika: osnovnye fakty.* M.: KNORUS, 2016.

18. Kulikov, V. A. “Simulacion of random measurement errors in shipbuilding programmatically.” V*estnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova* 5(33) (2015): 110–118.

19. Brandt, Z. *Statisticheskie metody analiza nablyudenii*. M.: Mir, 1975.

20. Kulikov, Valentin A., and Alexander V. Kulikov. "Scale division and resolving capacity of the scale." *Journal of Instrument Engineering* 56.3 (2013): 44–47.

21. Shishkin, I. F. *Teoreticheskaya metrologiya. Chast' 1. Obshchaya teoriya izmerenii. Uch. dlya vuzov.* Piter, 2010.

22. Kulikov, V. *Ocherki po teorii izmerenii. Analiz i komp'yuternoe modelirovanie*. LAP Lambert Academic Publishing, 2017. ISBN: 978-3-330-06928-2.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Куликов Валентин Александрович —
кандидат технических наук, доцент.
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала
С. О. Макарова»
198035, Российская Федерация, г. Санкт-Петербург,
ул. Двинская, 5/7
e-mail: *valekulikov@yandex.ru*

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Kulikov, Valentin A. —
PhD, associate professor
Admiral Makarov State University of Maritime
and Inland Shipping
5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg, 198035,
Russian Federation
e-mail: *valekulikov@yandex.ru*

Статья поступила в редакцию 17 июня 2017 г.
Received: June 17, 2017.

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

СУДОВЫЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ УСТАНОВКИ, СИСТЕМЫ И УСТРОЙСТВА

DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-4-786-794

SHIP ELECTRIC LIGHT SOURCES: STATE AND PROSPECTS OF DEVELOPMENT

S. Ye. Kuznetsov, Yu. V. Kudryavtsev

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

Based on the analysis of requirements of normative documents and technical literature considers the characteristics of the three types of light sources: incandescent, fluorescent and led. The prospects of led light sources according to the main technical characteristics: luminous efficiency and lifetime.

The main attention is paid to consideration of led lamps (DM), a typical scheme of power supply of SD. The issues associated with electromagnetic compatibility of SD. Noted that led light sources being non-linear loads distort the sine wave of the supply voltage and generate the network of higher harmonic (SH) components of a current that have a negative impact on supply mains, compromising the overall electromagnetic environment. To assess the possibility of functioning of the lighting systems of the courts on the basis of SD of the lamps were held the experimental research of power characteristics, which are listed in article a laboratory setting. The results of laboratory studies of SD showed the ability of electromagnetic compatibility of CD in marine power systems. It is indicated that for a number of SD lighting inrush current can reach ten values relative to the nominal that must be considered when selecting the switchgear and protective devices, especially in lighting systems with low power consumption. For ship characteristic network voltage fluctuation causes changes of luminous flux, which is negatively perceived by the person. Studies have shown that some SD lamps is constant luminous flux, regardless of the mains voltage and must be recommended for installation in networks of marine lighting.

The lack of existing regulations and sanitary regulations and methods of control for SD lighting. Conclusions about the absolute prospects as led light sources for ships.

Keywords: led light sources, electromagnetic compatibility.

For citation:
Kuznetsov, Sergey Ye., and Yurii V. Kudryavtsev. "Ship electric light sources: state and prospects of development." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova* 9.4 (2017): 786–794. DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-4-786-794.

УДК 621.3.048.004.58

СУДОВЫЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ИСТОЧНИКИ СВЕТА: СОСТОЯНИЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ

С. Е. Кузнецов, Ю. В. Кудрявцев

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

На основании анализа требований нормативных документов и технической литературы рассмотрены характеристики трёх типов источников света: ламп накаливания, люминесцентных и светодиодных. Показана перспективность светодиодных источников света по основным техническим характеристикам: светоотдаче и сроку службы.

Основное внимание уделено рассмотрению светодиодных (СД) ламп, приведена их типовая схема устройства питания. Рассмотрены вопросы, связанные с электромагнитной совместимостью СД. Отмечается, что светодиодные источники света, являясь нелинейной нагрузкой, искажают синусоиду пи-

тающего напряжения и генерируют в сеть высшие гармонические (ВГ) составляющие тока, которые оказывают негативное воздействие на питающую электрическую сеть, ухудшая общую электромагнитную обстановку. Для оценки возможности функционирования систем освещения судов на основе СД ламп были проведены экспериментальные исследования энергетических характеристик на приведённой в статье лабораторной установке. Приведены результаты лабораторных исследований СД, показавшие возможность электромагнитной совместимости СД в судовых электроэнергетических системах. Указано, что для ряда СД световых приборов пусковой ток включения может достигать пятнадцатикратного значения по отношению к номинальному, что следует учитывать при выборе коммутационно-защитных аппаратов, особенно в системах освещения с малой установленной мощностью. Для судовой сети характерны колебания напряжения, вызывающие изменения светового потока, негативно воспринимаемого человеком. Проведенные исследования показали, что ряд СД ламп характеризуется постоянством светового потока, вне зависимости от напряжения сети, и их надо рекомендовать для установки в сетях судового освещения. Отмечается отсутствие в действующих правилах и санитарных нормах требований и методов контроля для СД световых приборов. Сделаны выводы о безусловной перспективности СД источников света для судов.

Ключевые слова: светодиодные источники света, электромагнитная совместимость.

Для цитирования:
Кузнецов С. Е. Судовые электрические источники света: состояние и перспективы развития / С. Е. Кузнецов, Ю. В. Кудрявцев // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2017. — Т. 9. — № 4. — С. 786–794. DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-4-786-794.

Введение

В системах освещения морских судов в большинстве случаев используются лампы накаливания (ЛН) и газоразрядные люминесцентные лампы (ЛЛ), которые достигли технологического предела светоотдачи. Однако в последнее время осуществляется повсеместное внедрение надежных, экологичных и энергоэффективных светодиодных (СД) источников света, в том числе и на судах. В то же время СД источники света, являясь нелинейной нагрузкой, оказывают воздействие на питающую электрическую сеть, ухудшая общую электромагнитную обстановку.

Работа встроенного блока питания (драйвера) СД источников света и изменение величины напряжения в питающей электрической сети могут быть причинами понижения (колебания) светового потока, пульсаций освещенности и возникновения стробоскопического эффекта. Взаимосвязь данных факторов определяет уровень электромагнитной совместимости систем освещения, их способности при нормальной работе не оказывать недопустимых электромагнитных воздействий на питающую сеть, обеспечивая безопасное для человека оптическое излучение при наличии искажений питающего напряжения в электрической сети. В Правилах классификации и постройки морских судов Российского морского регистра судоходства (далее — Правила РМРС) [1] в настоящее время не определено применение СД источников света на судах морского флота, за исключением [1, табл. 6.7.1], содержащей требования к освещенности отдельных помещений и поверхностей морских судов. Нормы приводятся как для ЛН, так и для ЛЛ и СД ламп. В нормах искусственного освещения на судах морского флота установлены требования к минимальной освещенности только для ЛЛ и ЛН.

Таким образом, существующий комплекс нормативных документов по вопросам освещения морских судов не содержит однозначных требований для систем освещения на основе СД источников света, в результате чего представляет интерес рассмотрение вопросов, связанных с электромагнитной совместимостью эксплуатации СД освещения и СЭЭС.

Методы и материалы

Основным оценочным критерием энергоэффективности источника света является светоотдача, значения которой для разных ламп приведены в табл. 1. Как видно из табл. 1, наибольшей

светоотдачей обладают СД лампы, срок службы которых определён до 100 тыс. ч, однако следует иметь в виду, что надёжность СД источника света определяется в основном блоком питания. Одним из элементов схемы блока питания является двухполупериодный выпрямитель, срок службы которого может быть значительно ниже, чем собственно светодиода. Для питания СД ламп используются импульсные преобразователи постоянного тока (драйверы): нелинейная нагрузка, генерирующие токи высших гармоник (ВГ).

Таблица 1

Характеристики различных типов ламп

Источник света	Тип лампы	Достигнутая светоотдача, лм/Вт	Цветовая температура, К	Срок службы, тыс. ч	Наличие вредных веществ
Нить накаливания	Накаливания с инертным газом	15	2700	1	Нет
Электрический разряд в газе	Линейная ЛЛ	108	2700 – 6500	25	Содержат до 10 мг ртути (ядовитое вещество)
	Компактная ЛЛ	70	2700 – 6500	12	
Светодиод	СД лампа	102 (205)*	2700 – 6000	До 100	Нет

* Указана достигнутая светоотдача серийных изделий на основе СД с учетом эффективности драйвера и оптической системы (102 лм/Вт) и собственная светоотдача (205 лм/Вт) отдельного светодиода (передовые разработки).

Устройства питания СД ламп [2] – [4] выполняются в соответствии с электрической схемой, приведенной на рис. 1. Устройство содержит двухполупериодный выпрямитель на диодах *VD1 – VD4*, на который подается напряжение электрической сети через гасящий резистор *R1*. С выхода выпрямителя пульсирующее напряжение подается на конденсатор *C1* и далее на параметрической стабилизатор тока светоизлучающих диодов (СИД) *VD5*, …, *VD8* (см. рис. 1) либо на импульсный преобразователь в других устройствах [4]. Соотношение временных диаграмм напряжения электрической сети $U(t)$ и формы потребляемого тока $I(t)$ в типовой схеме устройств питания приведено на рис. 2.

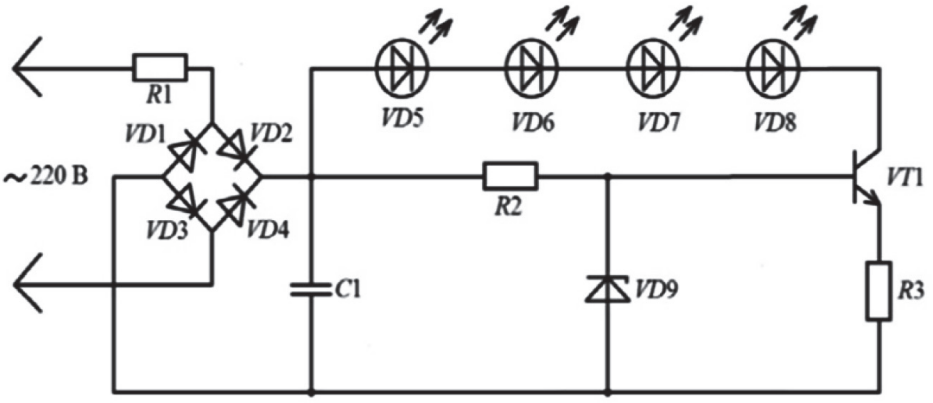


Рис. 1. Типовая электрическая схема устройств питания СД ламп

Потребление тока происходит короткими импульсами синхронно по времени с максимальными значениями напряжения питающей сети. Энергия импульса тока тратится на восстановление заряда конденсатора *C1*, израсходованного на питание светодиодной части за половину периода питающего переменного напряжения. Несоответствие формы потребляемого тока форме

питающего напряжения свидетельствует о нелинейном характере протекающих процессов и наличии эмиссии гармоник [5]. Предельные значения гармоник ограничены требованиями государственного стандарта [6].

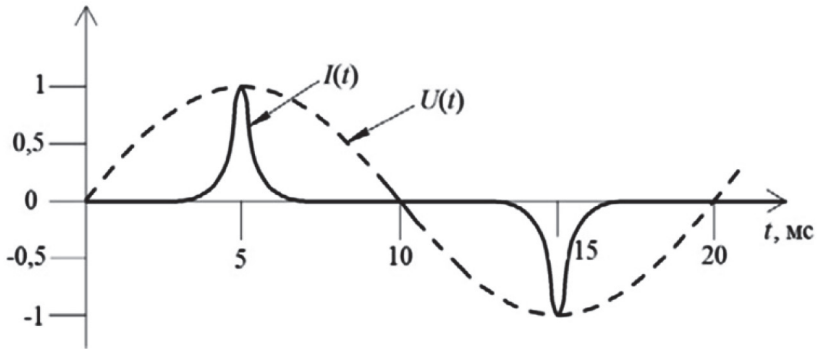


Рис. 2. Соотношение временных диаграмм напряжения электрической сети (пунктир) и формы потребляемого тока (сплошная линия) в типовой схеме устройств питания

Спектральный анализ ВГ тока может быть выполнен разложением аппроксимирующей временной зависимости тока, которая представлена на рис. 2, в ряд Фурье:

$$I(t) = I_0 + \sum_{k=1}^{\infty} a_k \cdot \cos k\omega t + \sum_{k=1}^{\infty} b_k \cdot \sin k\omega t, \qquad (1)$$

где a_k, b_k — коэффициенты разложения в ряд Фурье; ω — круговая частота напряжения питающей сети.

Вследствие симметричности формы тока относительно горизонтальной оси нулевая составляющая и четные гармоники в выражении (1) имеют значения, равные нулю. Спектральные составляющие тока, потребляемого от сети в типовой схеме устройств питания, рассчитанные в соответствии с выражением (1) и нормированные относительно значения первой гармоники, приведены на рис. 3.

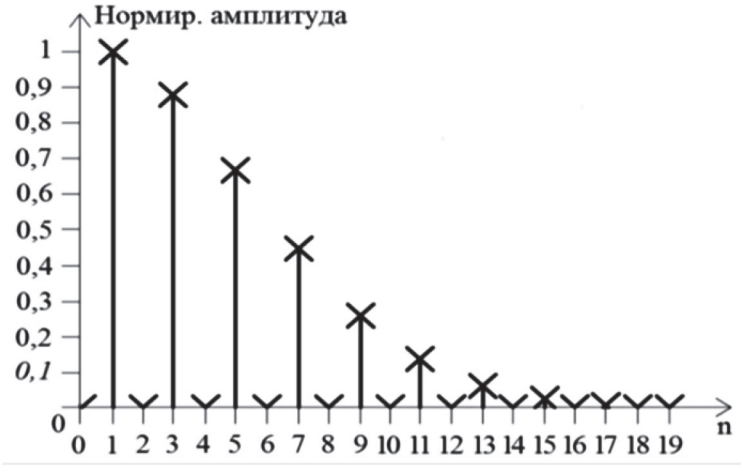


Рис. 3. Спектр тока, потребляемого от сети, в типовой схеме устройств питания (*n* — порядок гармоник тока)

В ходе экспериментальных исследований было выявлено, что в системах освещения судов без нулевого провода преобладающими ВГ тока являются составляющие пятого и седьмого порядка.

Системы освещения функционируют во взаимосвязи с судовыми электроэнергетическими системами (СЭЭС). Особенностями процесса функционирования СЭЭС являются:

– провалы и всплески напряжения и частоты на шинах ГРЩ в результате пуска или остановки судовых электроприводов (СЭП);

– длительные установившиеся отклонения напряжения и частоты от номинального значения, определяемые работой систем автоматического регулирования напряжения (САРН) и частоты генераторных агрегатов;

– колебания напряжения и частоты при распределении нагрузки между ГА при включении их на параллельную работу (или отключении).

Эти особенности влияют, в том числе, на работу судового освещения.

Решение проблем использования СД ламп, получение недостающей информации возможно на основе проведения экспериментальных исследований [7]. Использование двухлучевого осциллографа (GDS-71042) совместно с анализатором ПКЭ (Fluke 434) и многофункционального прибора Эколайт-01 (люксметр, пульсметр и яркомер) — рис. 4 — позволяет получить достаточный объем данных для достоверного и полного определения характеристик СД ламп.

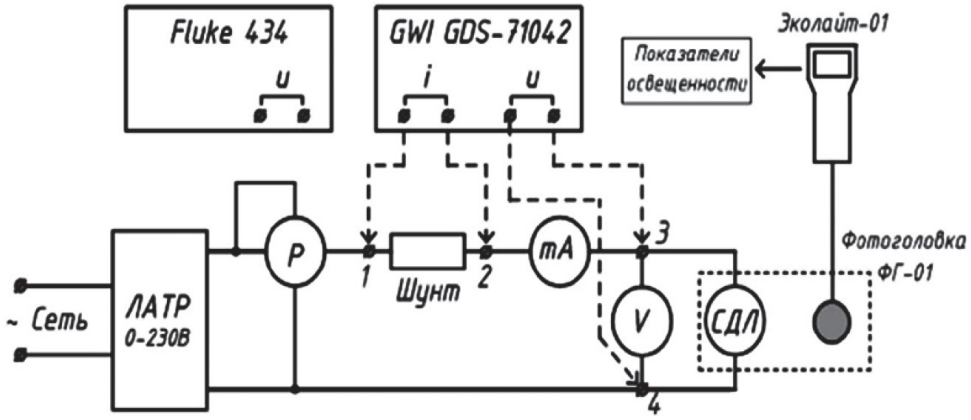


Рис. 4. Схема лабораторной установки для исследования СД ламп

Для исследования [7] был выбран ряд СД ламп, представленных на рынок производителями Xavax, Philips, Melitec (табл. 2). В технической документации для всех исследуемых изделий производителем указана величина потребляемого тока.

Таблица 2

Паспортные данные исследуемых ламп

Производитель	P, Вт	$U_{ном}$, В	$I_{ном}$, мА	Ф, лм	Срок службы, ч
Melitec	2,5	230	70	115	25 000
Xavax	3	230	41,6	100	20 000
Xavax	9	230	52	806	15 000
Philips	3,5	30	35	240	15 000
Philips	6	230	40	470	15 000

Для оценки возможности функционирования систем освещения судов на основе СД ламп были проведены экспериментальные исследования энергетических характеристик, в том числе коэффициента пульсаций освещенности $K_п$.

Результаты

Результаты экспериментальных исследований K_U и K_I СД ламп и их энергетические характеристики приведены в табл. 3 и 4 [8].

Таблица 3

Результаты экспериментальных исследований K_U и K_I СД ламп при напряжении 230 В

Производитель	P, Вт	K_U, %	K_I, %	Коэффициенты гармонических составляющих тока K_{In}, %					
				K_3	K_5	K_7	K_9	K_{11}	K_{13}
Melitech	2,5	1,6	13,6	9	6,1	7,6	3	3,7	0,7
Xavax	3	1,6	31,7	24,6	17,2	2,8	4,5	2,1	2,3
	9	1,6	35,7	28,5	17,5	5,7	9,8	2	3,2
Philips	3,5	1,6	56,7	45,2	14,2	18,3	13	17	11,5
	6	1,6	51,2	46,5	19,1	2,8	10,9	2,5	3,7

В табл. 3 K_U и K_I, соответственно, обозначают коэффициенты искажения синусоидальности кривой напряжения и тока. Как видно из таблицы, значения показателя качества электроэнергии K_U составляют 1,6 %, не превышая норму 10 %, определённую Правилами РМРС. Значения K_I изменяются в широких пределах, однако они не регламентированы данными Правилами.

Таблица 4

Результаты экспериментальных исследований энергетических характеристик СД ламп

Марка	$P_{ном}$, Вт	$U_{ном}$, В	I, мА	Q, В·А$_р$	cos φ	$I_п$, мА	$K_{Iп}$	Ф$_{уд}$, лм/Вт	$K_п$, %
Ikea	6,3	230	32	4,4	0,86	88	2,75	63	18,4
ISY	3	230	26	4,9	0,99	399	15,35	67	20
Melitec	2,5	230	72	16,3	0,15	232	3,22	46	100
Osram	7	230	36	зд	0,93	78	2,17	67	20,1
Philips	3,5	230	32	6,6	0,51	90	2,81	69	58,9
Philips	6	230	35	5,6	0,82	97	2,77	78	19
Philips	11,5	230	83	15,2	0,97	691	8,33	92	4,6
Xavax	9	230	49	6,3	0,89	105	2,14	89	21,2

Эквивалентная реактивная мощность $Q^{р}_{экв}$ определена в соответствии с выражениями (2) и (3):

$$Q^{р}_{экв} = \sqrt[2]{(UI)^2 - P^2}\,; \tag{2}$$

$$\cos\varphi = \frac{P}{UI}\,. \tag{3}$$

Обсуждение

Как видно из результатов анализа табл. 3 и 4, СД лампы генерируют ВГ тока, потребляя реактивную мощность. Для ряда СД световых приборов пусковой ток включения $I_п$ может достигать пятнадцатикратного значения по отношению к номинальному, что следует учитывать при выборе коммутационно-защитных аппаратов, особенно в системах аварийного освещения с малой установленной мощностью.

Величина освещенности, создаваемой СД лампами, при допустимом для морских судов длительном отклонении напряжения на –10 % снижается на 3 %, а при допустимом кратковременном отклонении напряжения на –20 % снижается на 7 %. Для ламп накаливания данный показатель

характеризуется снижением освещенности на 40 % и 60 % соответственно. Таким образом, несмотря на низкую по сравнению с другими типами ламп чувствительность к изменениям напряжения, работа СД источников связана с потреблением реактивной мощности и генерацией в сеть ВГ составляющих тока. Токи ВГ, распространяясь от СД источников света по электрической сети, создают электромагнитные поля с частотами от 50 Гц до 40 кГц и более, которые оказывают негативное воздействие на организм человека. Колебания напряжения вызывают изменения светового потока, который негативно воспринимается человеком. Это восприятие называется *фликером*. Степень воздействия фликера характеризуется таким показателем качества электроэнергии, как доза фликера.

Существующие нормы качества электроэнергии, так называемая *кратковременная доза фликера* P_{st} , измеренная в течение 10 мин, не должна превышать 1,38, и длительная доза фликера P_{lt}, измеренная в течение двух часов, не должна превышать 1,0 в течение 100 % времени интервала в неделю (ГОСТ 32144-2013). Однако в Правилах РМРС требование к дозе фликера не рассмотрено.

Величина постоянного напряжения, подведенного к СД лампе, и уровень его колебаний определяются схемой драйвера. Пульсации выпрямленного напряжения приводят к колебаниям тока и светового потока, что определяет допустимую дозу фликера. Таким образом, доза фликера в помещении, где установлены СД источники света, не может быть объективно определена посредством приборов, измеряющих показатели качества электроэнергии, так как они оценивают дозу фликера по колебаниям напряжения в сети.

В работе [9] предложено дозу фликера определять на основе измерений светового потока, создаваемого СД лампой. Проведенные исследования показали, что ряд СД ламп характеризуется постоянством светового потока вне зависимости от напряжения сети. В настоящее время на рынке представлены СД лампы как со стабилизированным световым потоком, так и с возможностью его регулирования за счет изменения напряжения. Последний тип СД ламп является чувствительным к колебаниям напряжения с точки зрения дозы фликера, и для установки в системах судового освещения не подходит. Помимо величины освещенности, для предотвращения несчастных случаев необходимо принимать во внимание пульсации освещенности, обуславливающие возникновение *стробоскопического эффекта*. Правилами РМРС установлены единые требования к освещенности для СД ламп и ламп накаливания. Однако СД источники света могут иметь значительный коэффициент пульсаций освещенности (см. табл. 4) и быть причиной стробоскопического эффекта.

Согласно [10], возникновение стробоскопического эффекта возможно при коэффициенте пульсаций освещенности, превышающем 10 %. Частота пульсаций освещенности, при которой возникает стробоскопический эффект, определяется частотой вращения приводов и исполнительных механизмов. На морских судах в качестве приводов в большинстве случаев применяются асинхронные двигатели. Их вращение происходит с частотой, несколько отличающейся в меньшую сторону от синхронных частот 50, 25, 16,6 и 12,5 об/с. Проведенные экспериментальные исследования [8] показывают, что у всех рассмотренных образцов СД ламп пульсации освещенности происходят на частоте 100 Гц и более. Следовательно, возникновение стробоскопического эффекта в системах освещения на основе СД источников света с точки зрения совпадения частот вращения механизмов и пульсации освещенности для механизмов, приводимых во вращение непосредственно асинхронными двигателями, маловероятно.

Результаты исследований электромагнитной совместимости СД источников света в системах электроснабжения морских судов показал, что в исследуемой СЭЭС показатели качества электроэнергии удовлетворяют требованиям Правил РМРС и ГОСТ 32144-2013.

Показатели несинусоидальности напряжения для большинства ВГ составляющих увеличились незначительно, что обусловлено следующими факторами:

– уменьшением суммарной потребляемой СД светильниками мощности в сравнении с люминесцентными;

– высоким сопротивлением судовой сети для протекания преобладающих у СД светильников токов третьей гармоники.

Наибольшее увеличение несинусоидальности приходится на пятую и седьмую ВГ составляющие напряжения.

Замена существующих линейных люминесцентных ламп (светоотдача 47 лм/Вт) на СД аналоги со светоотдачей 94 лм/Вт обеспечивает уменьшение установленной мощности осветительных приборов судна. Это существенно повышает устойчивость функционирования судовых систем освещения, особенно в условиях, сопровождающихся ограничениями электроснабжения.

Выводы

На основании вышеизложенного можно сделать следующие основные выводы.

1. Экспериментальные исследования СД ламп выявили относительно высокий уровень потребления реактивной мощности и эмиссии высших гармонических составляющих тока в электрическую сеть.

2. СД лампы имеют значительную кратность пускового тока, поэтому для установки на судах необходимо выбирать (в особенности в системах аварийного освещения) изделия с наименьшей величиной пускового тока, а также учитывать величину пускового тока СД источников света при выборе защитных аппаратов.

3. Для поддержания требуемого уровня освещенности при понижениях напряжения следует применять СД лампы со стабилизированным световым потоком.

4. Несмотря на низкую по сравнению с другими типами ламп чувствительность к изменениям напряжения, функционирование СД ламп сопряжено с проявлением фликера. Отсутствие в Правилах РМРС требований к ограничению пульсаций светового потока и несовершенство используемых методик определения дозы фликера затрудняют обеспечение биоэлектромагнитной совместимости СД ламп.

5. Следует применять СД источники света с минимальным коэффициентом пульсаций для уменьшения влияния фликера на обслуживающий персонал и снижения вероятности возникновения стробоскопического эффекта.

6. СД лампы с учетом их характеристик надёжности, экологичности и энергоэффективности, а также стабильности светового потока при изменениях напряжения сети имеют несомненные преимущества перед ЛН и ЛЛ и, безусловно, перспективны для использования в судовых системах освещения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Правила классификации и постройки морских судов: В 2 ч. — СПб.: Изд-во РМРС, 2015. — Ч. 2. —753 с.

2. *Махлин А. О.* Особенности проектирования блока питания для светодиодных ламп / А. О. Махлин // Полупроводниковая светотехника. — 2011. — Т. 1. — № 9. — С. 30–33.

3. *Семёнов Б. Ю.* Экономическое освещение для всех / Б. Ю. Семёнов. — М.: СОЛОН-ПРЕСС, 2010. — 224 с.

4. *Гончарова Ю. С.* Ускоренные испытания полупроводниковых источников света на долговечность / Ю. С. Гончарова, И. Ф. Гарипов, В. С. Солдаткин // Доклады Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники. — 2013. — № 2 (28). — С. 51–53.

5. *Туев В. И.* Микроволновые усилители с большим динамическим диапазоном / В. И. Туев, В. М. Коротаев. — Томск: Изд-во Том. гос. ун-та систем управления и радиоэлектроники, 2013. — 175 с.

6. ГОСТ 30804.3.2–2013. Совместимость технических средств электромагнитная. Эмиссия гармонических составляющих тока техническими средствами с потребляемым током не более 16 А (в одной фазе). Нормы и методы испытаний. — М.: Стандартинформ, 2014. — 29 с.

7. *Белей В. Ф.* Светодиодные лампы в системах судового освещения: вопросы электромагнитной совместимости / В. Ф. Белей, М. С. Харитонов // Вестник Мурманского государственного технического университета. — 2016. — Т. 19. — № 4. — С. 687–696. DOI: 10.21443/1560-9278-2016-4-687-696.

8. *Белей В. Ф.* Результаты экспериментальных исследований светодиодных ламп сетевого напряжения / В. Ф. Белей, М. С. Харитонов // Промышленная энергетика. — 2012. — № 9. — С. 9–14.

9. *Лисицкий К. Е.* Совершенствование метода оценки фликера / К. Е. Лисицкий // Системные исследования в энергетике: труды молодых ученых ИСЭМ СО РАН. — Иркутск, 2014. — С. 50–55.

10. Справочная книга по светотехнике / под ред. Ю. Б. Айзенберга. — 2-е изд., перераб. и доп. — М.: Энергоатомиздат, 1995. — 526 с.

REFERENCES

1. *Pravila klassifikatsii i postroiki morskikh sudov. Chast' 2*. SPb.: Izd-vo RMRS, 2015.

2. Makhlin, A. O. "Osobennosti proektirovaniya bloka pitaniya dlya svetodiodnykh lamp." *Poluprovodnikovaya svetotekhnika* 1.9 (2011): 30–33.

3. Semenov, B. Yu. *Ekonomicheskoe osveshchenie dlya vsekh*. M.: SOLON-PRESS, 2010.

4. Goncharova, Y. S., I. F. Garipov, and V. S. Soldatkin. "Accelerated testing of LED for durability." *Proceedings of TUSUR University* 2(28) (2013): 51–53.

5. Tuev, V. I., and V. M. Korotaev. *Mikrovolnovye usiliteli s bol'shim dinamicheskim diapazonom*. Tomsk: Izd-vo Tom. gos. un-ta sistem upr. i radioelektroniki, 2013.

6. Russian Federation. State Standart GOST 30804.3.2–2013. Electromagnetic compatibility of technical equipment. Harmonic current emissions (equipment input current <= 16 A per phase). Limits and test methods. M.: Standartinform, 2014.

7. Beley, V. F., and M. S. Kharitonov. "LED lamps in shipboard lighting systems: Aspects of electromagnetic compatibility." *Vestnik of MSTU* 19.4 (2016): 687–696. DOI: 10.21443/1560-9278-2016-4-687-696.

8. Belei, V. F., and M. S. Kharitonov. "Rezul'taty eksperimental'nykh issledovanii svetodiodnykh lamp setevogo napryazheniya." *Promyshlennaya energetika* 9 (2012): 9–14.

9. Lisitskii, K. E. "Sovershenstvovanie metoda otsenki flikera." *Sistemnye issledovaniya v energetike: trudy molodykh uchenykh ISEM SO RAN*. Irkutsk, 2014: 50–55.

10. Aizenberg, Yu. B., ed. *Spravochnaya kniga po svetotekhnike*. 2nd ed. M.: Energoatomizdat, 1995.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ	INFORMATION ABOUT THE AUTHORS
Кузнецов Сергей Емельянович — доктор технических наук, профессор ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова» 198035, Российская Федерация, г. Санкт-Петербург, ул. Двинская, 5/7 e-mail: *saees@mail.ru*, *kaf_saees@gumrf.ru*	**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: *saees@mail.ru*, *kaf_saees@gumrf.ru*
Кудрявцев Юрий Викторович — кандидат технических наук, доцент ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова» 198035, Российская Федерация, г. Санкт-Петербург, ул. Двинская, 5/7 e-mail: *uvk@rambler.ru*, *kaf_saees@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*

Статья поступила в редакцию 17 июня 2017 г.
Received: June 17, 2017.

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

DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-4-795-805

ACCOUNT OF LIMITS DURING OPTIMIZATION OF REFRIGERANTS IN-TUBE BOILING PARAMETERS IN SHIPBOARD EVAPORATORS

S. V. Koshelev, A. I. Eideyus

Kaliningrad State Technical University, Kaliningrad, Russian Federation

High heat transfer rate and low pressure drop for a given boiling conditions of the refrigerant is achieved when the difference between the mean temperature of the inner wall of the pipes t_T and the saturation temperature t_{02} at the outlet from the boiling zone becomes minimal. It takes into account both the irreversible losses caused by the presence of a finite temperature difference, and the effect of the evaporator's hydraulic resistance on the performance of the compressor. Existing optimization techniques for this criterion only apply to traditional refrigerants and use obsolete formulas to determine the heat transfer coefficient. The numerical method allows to take into account more factors influencing the process of boiling both traditional and alternative refrigerants. Using the computer program in a rather wide range of initial data determining the boiling conditions of the four refrigerants, optimal values of the mass velocity $(w\rho)_o$ are chosen at known heat flux densities q. After the modification of the program, the optimum length of boiling zone values l_{ko} are chosen for the given values of the heat load $Q_з$ and other combinations of the initial data. By regression analysis of the chosen results, power dependences are obtained for an approximate determination of the optimal parameters. The values of the power-law coefficients for calculating the basic variables sought are presented in two tables of text. Based on the analysis of the recommendations published in the domestic literature, formulated following the results of an experimental and analytical study of efficiently operating evaporators, it was proposed to introduce, when optimizing, restrictions on the temperature difference t_T and t_{02}, and also on the vapor velocity leaving the boiling zone. To remain within the permissible limits, it is recommended to change the values q and $Q_з$, as well as the internal diameter of the pipes d_T and the vapor conten x_1 at the refrigerant inlet to the evaporator.

Keywords: evaporator, refrigerant, in-tube boiling, energy efficiency, optimization, numerical method, parameter limitation.

For citation:
Koshelev, Sergey V., and Algirdas I. Eideyus. "Account of limits during optimization of refrigerants in-tube boiling parameters in shipboard evaporators." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 9.4 (2017): 795–805. DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-4-795-805.

УДК 621.565

УЧЕТ ОГРАНИЧЕНИЙ ПРИ ОПТИМИЗАЦИИ ПАРАМЕТРОВ ВНУТРИТРУБНОГО КИПЕНИЯ ХЛАДАГЕНТОВ В СУДОВЫХ ИСПАРИТЕЛЯХ

С. В. Кошелев, А. И. Ейдеюс

ФГБОУ ВО «Калининградский государственный технический университет»,
Калининград, Россия

Высокая интенсивность теплоотдачи и малое падение давления при заданных условиях кипения хладагента достигается, когда разность между средней температурой внутренней стенки труб и температурой насыщения на выходе из зоны кипения становится минимальной. Она учитывает как необратимые потери, обусловленные наличием конечной разности температур, так и влияние гидравлического сопротивления испарителя на производительность компрессора. Существующие методики оптимизации по этому критерию распространяются лишь на традиционные хладагенты и используют устаревшие формулы для определения коэффициента теплоотдачи. Численный метод позволяет учесть больше факторов, влияющих на процесс кипения как традиционных, так и альтернативных хладагентов. С использованием компьютерной программы в достаточно широком диапазоне исходных данных, определяющих условия кипения четырех хладагентов, подобраны оптимальные значения массовой скорости при известных плотностях теплового потока. После модификации программы подобраны значения оптимальной длины зоны кипения при заданных значениях тепловой нагрузки и других сочетаниях исходных данных. Путем ре-

грессионного анализа результатов подбора получены степенные зависимости для приближенного определения оптимальных параметров. Значения коэффициентов степенной зависимости для расчета основных искомых переменных представлены в двух таблицах. На основе анализа опубликованных в отечественной литературе рекомендаций, сформулированных по итогам экспериментального и аналитического исследования эффективно работающих испарителей, предложено при оптимизации вводить ограничения на разность температур, а также на скорость пара, выходящего из зоны кипения.

Ключевые слова: испаритель, хладагент, внутритрубное кипение, энергоэффективность, оптимизация, численный метод, ограничение параметров.

Для цитирования:
Кошелев С. В. Учет ограничений при оптимизации параметров внутритрубного кипения хладагентов в судовых испарителях / С. В. Кошелев, А. И. Ейдеюс // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2017. — Т. 9. — № 4. — С. 795–805. DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-4-795-805.

Введение

Энергоэффективность холодильных систем постоянно находится в поле зрения специалистов. На нее влияют многие факторы, среди которых затронем лишь вид хладагента и условия его кипения в испарителе. Как отмечается в статье [1], после принятия Монреальского протокола 1987 г. турбулентности с хладагентами в индустрии холода возникают беспрерывно. Применяется целый ряд озонобезопасных хладагентов, хотя ни один из них не удовлетворяет всем предъявляемым требованиям. Испарители с внутритрубным кипением обеспечивают малую емкость хладагента и относительно высокую энергоэффективность, но их проектирование требует повышенной точности расчета термогидродинамических характеристик [2]. Ввиду сложности процессов кипения жидкостей в трубах и каналах продолжается их исследование и разработка методов прогнозирования режимов течения и истинных параметров двухфазных потоков [3], [4]. Совершенствование методов расчета способствует более точному определению оптимальных параметров кипения хладагентов в испарителях.

Внутритрубное кипение хладагента на судах широко применяется в системах охлаждения грузовых и обитаемых помещений, а также технологического оборудования, включая аппараты для низкотемпературной обработки продуктов. На обеспечение работы многочисленных испарителей при разных температурах кипения затрачивается много электроэнергии. С позиций энергоэффективности, при внутритрубном кипении хладагентов необходимо добиваться высокой интенсивности теплоотдачи и малого падения давления двухфазного потока. Обе упомянутые величины зависят от многих факторов. Если, к примеру, увеличивается массовая скорость $w\rho$, то по сложным зависимостям повышаются как средний коэффициент теплоотдачи (КТО), так и падение давления. С повышением КТО уменьшается разность между средними температурами внутренней стенки труб и кипящего хладагента, что приводит к снижению необратимых потерь в испарителе. Повышение же падения давления сопровождается понижением давления и температуры кипения хладагента на выходе из испарителя, из-за чего уменьшаются производительность компрессора и холодильный коэффициент.

Разность между средними температурами внутренней стенки труб $t_т$ и кипящего хладагента t_0 зависит от плотности теплового потока q и среднего КТО α_a. Ее можно выразить как $t_т - t_0 = q/\alpha_a$. Падение давления в трубах сопровождается понижением температуры насыщения хладагента от t_{01} на входе до t_{02} на выходе из зоны кипения. Понижение температуры насыщения $\Delta t_s = t_{01} - t_{02}$. Оптимальный режим работы достигается при минимуме обеих разностей. Чтобы объединить их, в качестве критерия оптимальности используется разность между температурой стенки $t_т$ и температурой хладагента на выходе из зоны кипения t_{02}:

$$t_т - t_{02} = q/\alpha_a + y \cdot \Delta t_s. \quad (1)$$

Множитель y учитывает характер понижения температуры кипения по ходу движения хладагента. В статье [5] принято $y = 0{,}5$. Авторы статей [6], [7] этот множитель определяют по формуле

$$y = (3 - \Delta x) / (6 - 3\Delta x), \quad (2)$$

где $\Delta x = x_2 - x_1$ — приращение массового паросодержания хладагента в зоне кипения.

В статье [8] отмечается, что для большинства практических случаев подходит множитель y = 0,6. При малых значениях $\Delta t_s = t_{01} - t_{02}$ вполне допустимо принимать y = 0,5. Актуальность нового подхода к оптимизации обусловлена недостатками существующих методик и неизбежным переходом на применение альтернативных хладагентов.

Исходными данными для оптимизации массовой скорости хладагента в трубах $w\rho$ являются расчётная температура кипения t_0, массовое паросодержание на входе x_1 и на выходе x_2 зоны кипения, внутренний диаметр труб $d_т$ и плотность теплового потока q. Часто внутритрубное кипение хладагента происходит в плоских змеевиках, сформированных из горизонтальных труб, последовательно соединённых калачами. В таких случаях к исходным данным относятся также число труб в змеевике $n_т$, радиус осевой линии калачей $R_к$ и угол наклона плоскости змеевика Θ. После подбора оптимальной скорости $(w\rho)_o$ нетрудно определить длину зоны кипения $l_к$ и тепловую ее нагрузку $Q_з$. На практике нередко удобнее считать известной тепловую нагрузку $Q_з$ при заданных или выбранных значениях t_0, x_1, x_2, $d_т$, а также $n_т$, $R_к$ и Θ для змеевика. В таком случае оптимизация параметров внутритрубного кипения хладагента сводится к подбору длины зоны кипения $l_{ко}$, при которой достигается минимум разности $t_т - t_{02}$. Значения массовой скорости $w\rho$ и плотности теплового потока q становятся искомыми переменными.

Минимум разности $t_т - t_{02}$ является важным, но не единственным показателем удачного сочетания параметров внутритрубного кипения хладагента, поэтому при решении практических задач приходится вводить ряд ограничений с учетом опыта проектирования и результатов испытаний испарителей.

Методы

Опубликованные в статьях [5] – [7] методики оптимизации направлены на поиск оптимального значения массовой скорости $(w\rho)_o$ в трубах испарителей по минимуму разности $t_т - t_{02}$, при определении которой несколько различается множитель y в формуле (1). Более существенные различия обусловлены тем, что авторы использовали неодинаковые уравнения для определения КТО и падения давления при кипении хладагентов R12 и R22 в горизонтальных трубах. За счёт ряда упрощений каждому автору удалось получить свое уравнение для расчета оптимального значения массовой скорости $(w\rho)_o$. Недостаток указанных методик обусловлен тем, что их нельзя распространить на новые хладагенты, переход на использование которых вытекает из Международных соглашений по охране окружающей среды.

Методика [8] предполагает оптимизацию длины зоны кипения $l_к$ и падения давления хладагента ΔP. Для определения КТО в ней используется уравнение, которое учитывает изменение массового паросодержания хладагента Δx. Предлагается использовать общий коэффициент сопротивления трению, учитывающий трение в трубах, калачах, а также ускорение потока. Порядок его определения не обсуждается. С учетом характера изменения КТО α_a и падения давления ΔP в зависимости от массовой скорости $w\rho$ получено соотношение $y \cdot \Delta t_s = 0,27 \cdot q / \alpha_a$. Из него при y = 0,6 получается, что понижение температуры насыщения должно составлять $\Delta t_s \le 0,45 \cdot q / \alpha_a$. С этим соотношением не согласуется приведенный в статье пример и формулировка, согласно которой понижение температуры Δt_s должно быть в четыре раза меньше разности температур $t_т - t_0 = q / \alpha_a$. Окончательное выражение для оптимальной длины $l_{ко}$ с учетом введенных ранее обозначений может быть записано в виде

$$l_{ко} = 0,56 \cdot \left[\frac{\mu^{0,8} r^{3,4}}{\lambda (v'' - v') v'' T_0} \right]^{(1/2,9)} \cdot \frac{d_т^{1,29} \Delta x^{0,83}}{q^{0,62} (yF)^{0,344}}, \quad (3)$$

где μ — динамическая вязкость жидкости; λ — коэффициент теплопроводности жидкости; $r = i'' - i'$ — удельная теплота парообразования хладагента; v' и v'' — удельный объем жидкости

и пара; T_0 — абсолютная температура кипения; F — общий коэффициент трения, обычно равный 0,02 – 0,03.

Массовая скорость $w\rho$ не входит в последнее выражение, хотя используется для расчета числа Рейнольдса — Re. Нетрудно заметить, что при прочих равных условиях длина $l_{ко}$ пропорциональна $q^{-0,62}$. В данной методике, как и в методиках [5] – [7], по умолчанию предполагается турбулентный режим течения кипящей жидкости, хотя он вполне может быть переходным и даже ламинарным. При определенных условиях происходит расслоение жидкой и паровой фаз хладагента. Ввести условные переходы в одно итоговое выражение практически невозможно. Поэтому предлагается перейти к численному методу подбора оптимальной скорости $(w\rho)_o$ или длины $l_{ко}$.

Исследованию гидродинамики и теплообмена при кипении разных хладагентов в трубах посвящено много работ. В последние годы предпочтение отдается обобщенным методикам расчета локальных КТО и градиентов давления. На их основе составлена компьютерная программа [9]. Она распространяется на кипение десяти хладагентов в плоских змеевиках с числом горизонтальных труб от 2 до 20. Основные особенности программы кратко освещены в статьях [10], [11]. Исходными данными для неё служат вид хладагента, температура кипения t_0, паросодержания x_1 и x_2, диаметр труб $d_т$, число труб $n_т$, радиус калачей $R_к$, угол их наклона Θ, плотность теплового потока q и массовая скорость $w\rho$. Основными результатами расчета являются средний КТО α_a и полное падение давления в змеевике ΔP_n, хотя попутно определяются длина $l_к$, тепловая нагрузка $Q_з$, скорость пара на выходе из зоны кипения w_n, понижение температуры насыщения Δt_s и ряд других параметров.

Чтобы подбирать оптимальную скорость $(w\rho)_o$ при заданных условиях кипения хладагента, в окно пользователя программы выведены два значения разности $t_т - t_{02}$. Одно из них получается по формуле (1) при $y = 0,5$, а другое — вычислением y по формуле (2). Программа [9] определяет полное падение давления ΔP_n как сумму отдельных составляющих на коротких участках труб змеевика. Тем самым учитываются слабо выраженная криволинейность понижения давления P_0 и температуры t_0 кипения. Ввиду ограничений на понижение температуры Δt_s представляется приемлемым множитель $y = 0,5$. До перехода к подбору оптимальной длины $l_{ко}$ приведем основные соотношения между показателями кипения хладагента в трубах:

$$l_к = w\rho \cdot d_т r\left(x_2 - x_1\right)/\left(4q\right) = Q_з / (q\pi d_т); \tag{4}$$

$$w\rho \frac{4Q_з}{\pi d_т^2 r(x_2 - x_1)} = \frac{4q \cdot l_к}{d_т r(x_2 - x_1)}; \tag{5}$$

$$Q_з = q\pi d_т \cdot l_к = w\rho d_т^2 \cdot r\left(x_2 - x_1\right)/4. \tag{6}$$

Отсюда следует, что при известных условиях кипения хладагента, используя выбранный критерий оптимальности, можно по заданной плотности теплового потока q подбирать скорость $(w\rho)_o$ и находить соответствующие ей значения $l_к$, $Q_з$, массового расхода хладагента G_a, объемного расхода образующегося пара V_n и скорости пара на выходе из зоны кипения w_n. Если задана тепловая нагрузка змеевика $Q_з$, то можно подбирать оптимальную длину $l_{ко}$ и находить соответствующие ей значения q, $w\rho$,G_a, V_n, w_n и других переменных.

Для определения длины $l_{ко}$ по заданной нагрузке $Q_з$ составлена модификация программы [9]. К исходным данным в ней вместо q и $w\rho$ отнесены $Q_з$ и длина горизонтальных труб змеевика $l_т$. Искомыми переменными наряду с прежними величинами становятся q и $w\rho$, а длина зоны кипения определяется как $l_к = l_т n_т$. Эту модификацию для краткости обозначим как «Q, $l_т$». По обеим разновидностям программы необходимо последовательно изменять варьируемую величину, т. е. $w\rho$ при заданной q, или $l_т$ при заданной $Q_з$, до достижения минимальной разности $t_т - t_{02}$. Пока этот процесс не автоматизирован. Ввиду плавного приближения к минимуму он оказывается трудоемким, несмотря на почти мгновенное получение результата после ввода очередной переменной. Для ускорения процесса использована программа «Поиск решения». Опыт показывает, что результат по ней нередко зависит от заданного значения варьируемой переменной.

В подобных случаях приходится повторять поиск решения. Правильный результат обычно получается, когда задаваемое значение варьируемой величины немного меньше значения, при котором разность $t_т - t_{02}$ минимальная.

Результаты

С использованием программы [9] выполнен подбор оптимальной скорости $(w\rho)_о$ для хладагентов R404A, R410A, R290 и R22 при разных сочетаниях исходных данных: q, $d_т$, t_0, x_1. Они охватывают диапазон q = 500 ... 10000 Вт/м^2, $d_т$ = 0,005 … 0,02 м, t_0 = –45 … –5 °С, x_1 = 0,05 … 0,4. Во всех вариантах принято x_2 = 0,99, $n_т$ = 10, радиус калачей задавался как $R_к = 2\,d_т$, рассматривалось расположение змеевика в вертикальной плоскости при нижней подаче жидкости. Количество неповторяющихся сочетаний исходных данных для каждого хладагента превышало 260. При каждом сочетании наряду с $(w\rho)_о$ получены значения α_a, ΔP_n, $l_к$, Δt_s, $t_т - t_{02}$, w_n и ряда других переменных. Обобщение многочисленных результатов подбора проводилось с использованием подпрограммы классической линейной модели множественной регрессии. Наиболее подходящей для аппроксимации оказалась степенная зависимость вида

$$(w\rho)_о = 10^{a_0} q^{a_1} d_т^{a_2} (t_0 + 90)^{a_3} x_1^{a_4}. \qquad (7)$$

Путем логарифмирования и замены переменных она приводится к линейному уравнению регрессии. Встроенная в пакет Excel функция ЛИНЕЙН после ввода массива исходных данных выдает статистические оценки коэффициентов a_i и некоторые показатели точности аппроксимации. Среди них выделим коэффициент детерминированности r^2, который должен стремиться к единице, и стандартную ошибку для оценки искомой величины se_y, которая должна стремиться к нулю. Степенная зависимость (7) подходит и для аппроксимации других переменных, соответствующих оптимальной скорости $(w\rho)_о$, но с другими значениями коэффициентов a_i.

В табл. 1 приводятся коэффициенты уравнения (7) лишь для расчёта $(w\rho)_о$, $l_к$, α_a и $t_т - t_{02}$. При их использовании надо следить, чтобы значения исходных данных не выходили за указанные пределы. Остальные искомые переменные, включая Δt_s и $Q_з$, можно найти по соотношениям (4) и (6) с использованием данных о термодинамических свойствах хладагента на линии насыщения. Скорость выходящего из зоны кипения пара $w_n = w\rho \cdot v''$. Нетрудно определить и полное падение давления ΔP_n по найденному понижению температуры Δt_s относительно расчётной t_0. Заметим, что остальные методики оптимизации не выдают в явном виде значений α_a и $t_т - t_{02}$, хотя полученные по ним данные о q и $w\rho$ позволяют найти $l_к$ и $Q_з$.

Таблица 1

Основные итоги регрессионного анализа результатов подбора скорости $(w\rho)_о$

Переменные	Статистические оценки						
	a_0	a_1	a_2	a_3	a_4	r^2	se_y
	R404						
$w\rho$	–0,56033	0,33165	0,109574	0,927951	0,026291	0,92768	0,042902
$l_к$	4,253288	–0,66726	1,142993	0,735723	–0,17933	0,976179	0,046473
α_a	–0,02093	0,542639	0,084079	0,837992	0,087445	0,931246	0,058906
$t_т - t_{02}$	1,345793	0,354338	–0,03111	–1,22078	–0,05682	0,935844	0,042449
	R410						
$w\rho$	–0,93179	0,357174	0,044701	1,006704	0,021959	0,965928	0,030247
$l_к$	4,121621	–0,63812	1,074081	0,734097	–0,20083	0,987266	0,032384
α_a	–0,02341	0,512887	–0,06207	0,793528	0,076397	0,947805	0,047534
$t_т - t_{02}$	1,221179	0,378193	0,037432	–1,17086	–0,04703	0,957423	0,036391

Таблица 1
(*Окончание*)

	R290						
$w\rho$	–1,18068	0,384067	0,16381	1,039124	–0,02255	0,915844	0,054698
$l_к$	3,824598	–0,61323	1,19172	0,914251	–0,24426	0,957119	0,060096
α_a	–0,25559	0,578975	0,095453	0,920975	0,053118	0,924292	0,068004
$t_т - t_{02}$	1,271888	0,34658	–0,00309	–1,16049	–0,06471	0,925559	0,044615
	R22						
$w\rho$	–1,21615	0,377104	0,105878	1,155761	0,013268	0,927965	0,051315
$l_к$	3,612476	–0,62343	1,102152	0,970541	–0,17944	0,964763	0,054663
α_a	–1,26714	0,640161	0,048011	1,271581	0,0791	0,940879	0,070378
$t_т - t_{02}$	1,980877	0,30207	–0,02286	–1,42142	–0,05546	0,957369	0,034394

Подбор оптимальной длины $l_{ко}$ проводился с использованием модифицированной программы «Q, $l_т$». После ввода в неё тепловой нагрузки $Q_з$ и остальных параметров, определяющих условия кипения выбранного хладагента, подбиралась длина прямых труб $l_{то}$ до достижения минимальной разности $t_т - t_{02}$. Длина зоны кипения $l_{ко} = l_{то} \cdot n_Т$. Такой подбор выполнен для хладагентов R404A, R410A, R507 и R22. По каждому из них рассмотрено по 350 неповторяющихся сочетаний исходных данных в диапазоне $t_0 = –45 \ldots –5$ °C; $d_т = 0{,}004 \ldots 0{,}02$ м; $x_1 = 0{,}01 \ldots 0{,}4$; $Q_з = 200 \ldots 8000$ Вт. По-прежнему, $x_2 = 0{,}99$; $R_k = 2 \cdot d_т$; $n_т = 10$; угол наклона плоскости змеевика $\Theta = 0°$; подача жидкости в нижнюю трубу змеевика.

Расчёты показывают, что значения разностей Δt_s, $t_т - t_{02}$ существенно зависят от диаметра $d_т$ и нагрузки $Q_з$. Чтобы получить приемлемые результаты с уменьшением диаметра $d_т$ и понижением температуры t_0, следует уменьшать нагрузку $Q_з$. Основными результатами расчета наряду с $l_{ко}$ являются значения α_a, ΔP_n, Δt_s, $t_т - t_а$, q, $w\rho$, w_n. Для компактного представления взаимосвязи между исходными данными и результатами поиска оптимальной длины $l_{ко}$ выполнен регрессионный их анализ с использованием степенной зависимости:

$$l_{ко} = 10^{b_0} Q_т^{b_1} d_т^{b_2} x_1^{b_3} (t_0 + 90)^{b_4}. \quad (8)$$

Такая зависимость оказалась подходящей для аппроксимации не только длины $l_{ко}$, но и соответствующих ей значений других искомых переменных. Понятно, что для каждой переменной при кипении любого хладагента получаются свои значения коэффициентов b_i. В табл. 2 приводятся коэффициенты $b_0 \ldots b_4$ для расчёта лишь значений $l_{ко}$, α_a, $w\rho$ и $t_т - t_{02}$ при кипении четырех хладагентов. Эти данные наряду с нагрузкой $Q_з$ позволяют найти q и $w\rho$ по соотношению (6). Значения коэффициента α_a представляют самостоятельный интерес. Они позволяют найти среднюю разность $t_т - t_0$ при оптимальной длине $l_{ко}$.

Таблица 2

Основные итоги регрессионного анализа результатов подбора длины $l_{ко}$

Переменные	Статистические оценки						
	b_0	b_1	b_2	b_3	b_4	r^2	se_y
	R404						
$l_{ко}$	7,739485	–1,17562	3,452007	–0,34029	2,184998	0,959215	0,062498
$w\rho$	–5,2546	0,994037	–1,97044	0,163248	0,219576	0,99024	0,023873
α_a	–6,73887	1,482514	–2,91207	0,291571	–0,19918	0,941921	0,083014
$t_т - t_{02}$	–1,27196	0,752669	–1,62158	0,075293	–2,1158	0,960475	0,037398

Таблица 2
(*Окончание*)

	R410						
$l_{ко}$	7,942196	–1,16517	3,453571	–0,34464	2,161622	0,966707	0,056904
$w\rho$	–5,36921	0,992145	–1,96791	0,163097	0,21904	0,990083	0,024046
α_a	–6,88646	1,490796	–2,97351	0,296652	–0,21709	0,955482	0,072959
$t_т - t_{02}$	–1,26023	0,698798	–1,50263	0,061957	–1,99541	0,959044	0,036167
	R507						
$l_{ко}$	7,700551	–1,13681	3,381965	–0,36417	2,05781	0,952935	0,065896
$w\rho$	–5,25571	0,994663	–1,97098	0,16336	0,223584	0,990308	0,023876
α_a	–6,68962	1,459958	–2,88172	0,320998	–0,14355	0,938906	0,085003
$t_т - t_{02}$	–1,36113	0,755588	–1,62824	0,077074	–2,08434	0,959385	0,037727
	R22						
$l_{ко}$	7,841163	–1,23134	3,566147	–0,35578	2,32884	0,959402	0,06461
$w\rho$	–5,22331	0,991386	–1,97186	0,1679	0,162782	0,990763	0,023004
α_a	–7,40713	1,59948	–3,17953	0,316035	–0,34812	0,945055	0,086568
$t_т - t_{02}$	–0,78201	0,718299	–1,52709	0,072298	–2,17635	0,952318	0,041585

Достаточно высокие значения коэффициента детерминированности r^2 при малой ошибке se_y в табл. 1 и 2 указывают на хорошую степень корреляции между исходными данными и искомыми переменными, если исходные данные находятся в пределах своего диапазона. Сочетания исходных данных, при которых разности Δt_s и $t_т - t_{02}$ заметно превышали 5 ºС, не входят в число вариантов, рассмотренных при подборе как скорости $(w\rho)_о$, так и длины $l_{ко}$.

Примеры определения оптимальной скорости хладонов R22 и R12 приводятся в статьях [5], [6]. Представляет интерес сравнение приведённых в них данных с результатами численного подбора $w\rho$. В статье [5] недостаточно полно указаны условия кипения хладонов. Более полную информацию ее автор привел в источнике [12]. Для сопоставления по приведенным в источниках [12] и [6] рисункам найдены значения оптимальной скорости хладона R22 при одинаковых плотностях теплового потока q = 2000; 5000; 10000 Вт/м² и полном испарении жидкости, т. е. $x_2 = 1$. Наряду с данными t_0, x_1 и $d_т$ они приводятся в табл. 3. Рядом с ними указаны значения $(w\rho)_о$, подобранные численным методом при тех же условиях кипения. Дополнительно приведены соответствующие им значения длины $l_к$, коэффициента α_a и разности $t_т - t_{02}$.

По данным табл. 3 нетрудно заметить, что при t_0 = 0 ºС приведенные в источниках [12], [6] оптимальные скорости $w\rho$ несколько превышают их значения, подобранные численным методом. Предположительно причиной такого превышения может служить приближённый подход к определению потерь давления двухфазного потока в змеевиковых испарителях. В методиках [5], [6] есть лишь упоминание о калачах, а падение давления в них отдельно не рассматривается. Правда, используется фиксированный коэффициент сопротивления трению, который должен учитывать все составляющие падения давления потока.

В случае кипения хладона R22 при t_0 = –30 ºС оптимальные скорости $w\rho$ по данным [12] оказались заметно ниже значений, подобранных с использованием программы [9]. Заметим, что по обеим методикам с понижением температуры t_0 уменьшается оптимальные скорости $w\rho$. Более резкое уменьшение скорости $w\rho$ может быть связано с использованием в книге [8] формул для определения среднего коэффициента теплоотдачи α_a, которые в явном виде не учитывают температуру t_0 и изменение паросодержания $x_2 - x_1$. Расхождение результатов расчета коэффициента α_a по двум формулам в источнике [12] объясняется трудно учитываемыми факторами, что свидетельствует об ориентировочном характере полученных данных об оптимальной скорости.

Таблица 3

Оптимальная скорость R22 по трем методикам

Данные источников [12], [6]						Численный подбор			
Источник	t_0, °C	x_1	$d_т$, м	q, Вт/м²	$w\rho$, кг/(м²·с)	$w\rho$, кг/(м²·с)	$l_к$, м	α_a, Вт/(м²·К)	$t_т - t_{02}$, °C
[12]	0	0,15	0,017	2000 5000 10000	140 202 280	132,2 172,5 205,8	48,9 25,5 18,3	1680 2194 3014	1,79 2,80 4,07
[12]	–30	0	0,017	2000 5000 10000	57 90 122	80,6 115,9 140,5	38,8 22,3 13,5	921,2 1679 2402	3,37 4,38 5,46
[6]	0	0,15	0,01	2000 5000 10000	125 190 240	113,8 170,8 240,2	24,8 14,9 10,5	1475 2260 3337	1,81 2,79 3,77
[6]	0	0,15	0,02	2000 5000 10000	140 217 280	120,8 180,8 253,4	52,6 31,5 22,1	1396 2178 2954	1,88 2,87 4,16

Оптимальная длина труб змеевика $l_{ко}$ определена в статье [12] при следующих условиях кипения хладона R22: $t_0 = 0$ °C; $x_1 = 0{,}25$; $x_2 = 1$; $d_т = 0{,}011$ м; $q = 5000$ Вт/м². Приняты коэффициент трения $F = 0{,}02$ и множитель $y = 0{,}6$. По формуле (3) получена длина $l_{ко} = 14{,}4$ м. Попутно найдена скорость пара на выходе из зоны кипения $w_n = 8$ м/с. Используя программу [9], при тех же исходных данных находим оптимальную скорость $(w\rho)_о = 171$ кг/(м²·с). Ей соответствуют искомые переменные $l_к = 14{,}44$ м; $w_n = 8{,}05$ м/с; $\alpha_a = 2301{,}4$ Вт/(м²·К); $\Delta P_n = 19950$ Па; $\Delta t_s = 1{,}25$ °C; $t_т - t_{02} = 2{,}7976$ °C; $Q_з = 2494$ Вт. Подставляя значения $Q_з = 2494$ Вт и $l_т = 1{,}444$ м при $n_т = 10$ в модифицированную программу «Q, $l_т$», получаем прежние значения искомых переменных. Это подтверждает правильность модифицированной программы и свидетельствует о хорошем совпадении результатов подбора $(w\rho)_о$ по программе [9] с данными статьи [8].

Если по модифицированной программе «Q, $l_т$» проводить оптимизацию длины $l_к$, варьируя длиной $l_т$, то при прежних условиях кипения и $Q_з = 2494$ Вт после поиска решения имеем длину $l_{ко} = 31{,}54$ м, которой соответствуют значения $\alpha_a = 2141{,}8$ Вт/(м²·К), $\Delta P_n = 32530$ Па, $q = 2289{,}4$ Вт/м², $w\rho = 171$ кг/(м²·с), $\Delta t_s = 2{,}45$ °C, $t_т - t_{02} = 2{,}2939$ °C. Как видим, при той же нагрузке $Q_з$ длина $l_{ко}$ увеличивается в 2,18 раз, а тепловой поток q уменьшается во столько же раз. Несмотря на увеличение ΔP_n в 1,63 раза и Δt_s в 1,96 раз, показатель оптимальности $t_т - t_{02}$ уменьшается в 1,22 раза. Полученные данные оказались несколько неожиданными. Поэтому были выполнены сравнительные расчеты при других сочетаниях исходных данных. Выяснилось, что во всех случаях подбор $(w\rho)_о$ по заданной q дает более низкие значения $l_к$ и ΔP_n, чем при подборе $l_{ко}$ по нагрузке $Q_з$, найденной в результате подбор $(w\rho)_о$. Расхождения между этими и другими сравниваемыми величинами уменьшаются по мере снижения плотности теплового потока q. Характерно, что значения $w\rho$ и w_n совпадают во всех сравниваемых вариантах.

Отмеченные расхождения обусловлены ограничениями на изменение разных параметров в двух используемых программах. Программа [9] предполагает неизменность плотности теплового потока q, а минимум разности $t_т - t_{02}$ находится путем подбора массовой скорости $(w\rho)_о$. Попутно заметим, что на практике постоянство плотности теплового потока q обеспечивается лишь при электрообогреве труб. В остальных случаях она определяется условиями теплопередачи. В модифицированной программе «Q, $l_т$» заданной считается тепловая нагрузка $Q_з$, а величина q при подборе длины $l_{ко}$ может изменяться. Минимальная разность (1) при совпадающих значениях $Q_з$, $w\rho$ и w_n оказывается несколько меньше при использовании программы «Q, $l_т$» за счет увеличения длины $l_к$. Анализ сравнительных расчётов показывает, что при подборе длины $l_{ко}$ уменьшается составляющая q/α_a уравнения (1), но увеличивается величина Δt_s по сравне-

нию с результатами подбора $(w\rho)_о$ при аналогичных условиях кипения и одинаковых значениях $Q_з$. Выходит, что при подборе $l_{ко}$ растет коэффициент обратимости обратного цикла [13], но снижается производительность компрессора [14].

Обсуждение

Как следует из ранее изложенного, минимум разности $t_т - t_{02}$ может быть достигнут при разных сочетаниях параметров на стороне хладагента в зависимости от вида задаваемой величины, т. е. q или $Q_з$. Без учета интенсивности теплоотдачи на стороне охлаждаемой среды значения этих величин можно предсказать лишь приближенно. Обе они зависят от вида охлаждаемой среды, скорости ее движения, а также типа и степени наружного оребрения труб. По-видимому, при проектировании змеевиковых испарителей можно по аналогии с существующими задавать q и находить $(w\rho)_о$.

Подбор типоразмера змеевиков из числа выпускаемых промышленностью применительно к конкретным условиям кипения хладагента лучше проводить в зависимости от нагрузки $Q_з$. В общем случае, целесообразно по ориентировочным значениям q найти $(w\rho)_о$ и $Q_з$, а затем по $Q_з$ определить $l_{ко}$. На основе сопоставления результатов можно принять окончательное решение с учетом других ограничений. Уже отмечалось, что нежелательны сочетания исходных данных, при которых значения $t_т - t_{02}$ и/или Δt_s превышают 5 °С. Как правило, в таких случаях скорость насыщенного пара $w_п$ превышает 15 м/с. Таким значением, в частности, ограничивают скорость пара в линии всасывания компрессора. В зарубежной практике эту скорость ограничивают так, чтобы понижение температуры насыщения на участке от испарителя до компрессора не превышало $2^oF = 1{,}1\ ^oC$. С позиций влияния на производительность компрессора подобные ограничения следует распространить и на зону кипения хладагента в трубах. Исходя из возможных описок в статье [8], представляется целесообразным упомянутое ранее ограничение записать как $\Delta t_s \le 0{,}45(t_т - t_{02})$. Для рассмотренного в ней примера по программе [9] получено $\Delta t_s = 1{,}25\ ^oC$, а $0{,}45(t_т - t_{02}) = 1{,}26\ ^oC$, что вполне правдоподобно.

По экспериментальным и расчетным данным в отечественной литературе приводятся рекомендуемые значения средней логарифмической разности Θ_m между температурами охлаждаемой среды и кипящего хладагента. В большинстве случаев она находится в пределах $\Theta_m = 6 \ldots 10\ ^oC$ при охлаждении как жидкости, так и воздуха. С понижением температуры t_0 разность Θ_m несколько уменьшается. Рассмотренные испарители чаще всего работают при массовой скорости хладагента $w\rho = 40 \ldots 140$ кг/(м^2·с). Для судовых холодильных установок нормальной считается температура кипения t_0, которая на 5 – 7 °С ниже средней температуры жидкого хладоносителя и на 7 – 10 °С ниже температуры охлаждаемого воздуха. В автономных кондиционерах, зная температуру охлаждаемого воздуха $t_{в1}$, принимают температуру кипения как $t_0 = t_{в1} + (13 \ldots 17\ ^oC)$, но добиваются средней температуры наружной поверхности ребристого воздухоохладителя $t_н = t_0 + (5 \ldots 7\ ^oC)$. Поскольку температурный напор Θ_m имеет три составляющие, предположим, что одну треть его может занимать разность $t_т - t_0 = (6...10\ ^oC)/3$. Тогда $q/\alpha_a = 2 \ldots 3{,}3\ ^oC$. Не должна превышать этого значения и величина Δt_s, обусловленная падением давления $\Delta P_п$. Если считать, что проведенную в статье [8] устную формулировку следует записать как $\Delta t_s = \Theta_m/4$, то получается $\Delta t_s \le 1{,}5 \ldots 2{,}5\ ^oC$.

Вытекающие из разных рекомендаций ограничения не совпадают. Полагая допустимыми значения $q/\alpha_a = 2 \ldots 3{,}3\ ^oC$ и Δt_s 1,5 … 2,5 °С, следует ограничить разность $t_т - t_{02}$ в пределах 2,75 … 4,55 °С, а скорость пара $w_п$ — 15 м/с. С понижением температуры t_0 из-за снижения плотности пара ρ'' при прочих равных условиях увеличиваются значения $\Delta P_п$, Δt_s и $w_п$. Поэтому оптимальная скорость $(w\rho)_о$ уменьшается. Тем не менее, как следует из табл. 3, при $t_0 = -30\ ^oC$ разность $t_т - t_{02}$ становится выше 4,55 °С, когда q — 5000 Вт/м^2. Чтобы учесть обсуждаемые ограничения, приходится уменьшать задаваемы значения q или $Q_з$, хотя их увеличение желательно для интенсификации теплоотдачи на стороне хладагента и уменьшения числа змеевиков в испарителе.

Заключение

Оптимизация параметров внутритрубного кипения хладагентов по минимуму разности $t_т - t_{02}$ может привести к неверным результатам, если неправильно выбрать исходные данные. Предлагается добиваться значений $t_т - t_{02} \le 4{,}55$ °С, ее составляющих $q/\alpha_a \le 3{,}3$ °С, $\Delta t_s \le 2{,}5$ °С и скорости насыщенного пара $w_n \le 15$ м/с путем ограничения плотности теплового потока q или тепловой нагрузки на змеевик $Q_з$, а также подбора диаметра труб $d_т$ с учетом температуры кипения t_0 и начального паросодержания x_1. Приведенные численные значения нуждаются в дальнейшем уточнении; требуется подготовка рекомендаций по определению оптимального числа змеевиков, направленных на минимизацию массогабаритных показателей испарителя, что актуально для судового оборудования.

Наиболее полно учесть особенности кипения хладагентов в трубах позволяет лишь численный метод, основанный на использовании обобщенных методик расчета локальных коэффициентов теплоотдачи и градиентов давления, которые базируются на конкретных сериях опытных данных.

Составленная программа [9], в отличие от существующих методик [5] – [8], наряду с оптимальным значением массовой скорости $(w\rho)_о$ или длины зоны кипения $l_{ко}$ выдает значения остальных показателей процесса кипения до десяти хладагентов. Путем регрессионного анализа результатов подбора $(w\rho)_о$ и $l_{ко}$ для четырех хладагентов получены степенные зависимости, позволяющие найти как $(w\rho)_о$ или $l_{ко}$, так и соответствующие им основные показатели. Значения коэффициентов степенной зависимости приводятся в табл. 1 и 2 для использования в инженерной практике. Планируется дополнить программу модулем автоматического поиска минимальный разности $t_т - t_{02}$ и выдачи предупреждения о выходе искомых переменных за установленные пределы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Цветков О. Б.* Энерго- и экологически эффективные рабочие вещества в технологиях генерации холода и теплоты / О. Б. Цветков, Ю. А. Лаптев // Холодильная техника. — 2016. — № 3. — С. 18–24.

2. *Малышев А. А.* Перспективные типы испарителей холодильных машин / А. А. Малышев, В. О. Мамченко, В. М. Мизин [и др.] // Вестник Международной академии холода. — 2013. — № 2. — С. 13–18.

3. *Малышев А. А.* Новые методы прогнозирования режимов течения кипящих хладагентов в макро- и миниканалах / А. А. Малышев, К. В. Киссер, А. С. Филатов // Вестник Международной академии холода. — 2016. — № 2. — С. 67–70.

4. *Малышев А. А.* Истинные параметры кипящих хладагентов в трубах и каналах / А. А. Малышев, К. В. Киссер, А. В. Зайцев // Вестник Международной академии холода. — 2017. — № 2. — С. 53–56.

5. *Гоголин А. А.* Об оптимальной скорости фреона в трубках испарителей / А. А. Гоголин // Холодильная техника. — 1965. — № 1. — С. 29–33.

6. *Захаров Ю. В.* Определение оптимальной массовой скорости хладагента в горизонтальных трубках испарителей / Ю. В. Захаров, Н. И. Радченко // Холодильная техника. — 1980. — № 3. — С. 25–29.

7. *Granryd E.* Om val av seriekopplad rörlängd och tryckfall vid förongare med fullstandig förongning / E. Granryd // Kylteknisk tidskrift. — 1966. — № 4. — Pp. 65–68.

8. *Granryd E.* Optimum Circuit Tube Length and pressure drop on the Refrigerant side of evaporator / E. Granryd // International Refrigeration and Air Conditioning Conference. — Paper 143. — 1992. — Pp. 73–82.

9. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2015663262. Общая программа расчета коэффициента теплоотдачи и падения давления при кипении десяти хладагентов в плоских змеевиках с разным числом труб / А. И. Ейдеюс, С. В. Кошелев; правообладатель ФГБОУ КГТУ. — Дата регистрации 31.08.2015 г.

10. *Ейдеюс А. И.* Сравнение интенсивности теплоотдачи и падения давления при кипении хладагентов R404A и R22 в горизонтальных трубах / А. И. Ейдеюс, М. Ю. Никишин, С. В. Кошелев // Вестник Международной академии холода. — 2015. — № 1. — С. 69–74.

11. *Ейдеюс А. И.* Теплоотдача и падение давления при кипении хладагентов в змеевиках / А. И. Ейдеюс, С. В. Кошелев, М. Ю. Никишин // Вестник Международной академии холода. — 2016. — № 2. — С. 42–47.

12. *Гоголин А. А.* Интенсификация теплообмена в испарителях холодильных машин/ А. А. Гоголин, Г. Н. Данилова, В. М. Азарсков, Н. М. Медникова. — М.: Легкая и пищевая промышленность, 1982. — 224 с.

13. *Кошелев С. В.* Влияние условий внутритрубного кипения хладагентов на внешнюю необратимость в испарителях / С. В. Кошелев, А. И. Ейдеюс, М. Ю. Никишин // Известия КГТУ. — 2016. — № 42. — С. 117–125.

14. *Ейдеюс А. И.* Падение давления в змеевиковых испарителях и производительность компрессора / А. И. Ейдеюс, С. В. Кошелев, М. Ю. Никишин // Компрессорная техника и пневматика. — 2015. — № 5. — С. 14.

REFERENCES

1. Tsvetkov, O. B., and Yu. A. Laptev. "Energoi ekologicheski effektivnye rabochie veshchestva v tekhnologiyakh generatsii kholoda i teploty." *Kholodil'naya tekhnika* 3 (2016): 18–24.

2. Malyshev, Aleksandr A., Valery O. Mamchenko, V. M. Mizin, A. V. Potanina, S. I. Proshin, and T. I. Devyatov. "Perspective types of evaporators of refrigerators." *Vestnik Mezhdunarodnoi Akademii Kholoda* 2 (2013): 13–18.

3. Malyshev, A. A., K. V. Kisser, and A. S. Filatov. "New methods of forecasting flow regimes for boiling refrigerant in macro and mini channels." *Vestnik Mezhdunarodnoi Akademii Kholoda* 2 (2016): 67–70.

4. Malyshev, A. A., K. V. Kisser, and A. V. Zaitsev. "true parameters of boiling refrigerants in tubes and channels." *Vestnik Mezhdunarodnoi Akademii Kholoda* 2 (2017): 53–56.

5. Gogolin, A. A. "Ob optimal'noi skorosti freona v trubkakh isparitelei." *Kholodil'naya tekhnika* 1 (1965): 29–33.

6. Zakharov, Yu. V., and N. I. Radchenko. "Opredelenie optimal'noi massovoi skorosti khladagenta v gorizontal'nykh trubkakh isparitelei." *Kholodil'naya tekhnika* 3 (1980): 25–29.

7. Granryd, E. "Om val av seriekopplad rörlängd och tryckfall vid förongare med fullstandig förongning." *Kylteknisk tidskrift* 4 (1966): 65–68.

8. Granryd, E. "Optimum Circuit Tube Length and pressure drop on the Refrigerant side of evaporator." *International Refrigeration and Air Conditioning Conference*. Paper 143. 1992. 73–82.

9. Eideyus, A. I., and S. V. Koshelev. Certificate for computer programm №2015663262. Obshchaya programma rascheta koeffitsienta teplootdachi i padeniya davleniya pri kipenii desyati khladagentov v ploskikh zmeevikakh s raznym chislom trub. Russian Federation assignee. Publ. 31 Aug. 2015.

10. Eideyus, Algirdas I., Mikhail Yu. Nikishin, and Sergey V. Koshelev. "The comparison of the intensity of heat transfer and pressure drop during boiling of the refrigerants R404A and R22 in horizontal pipes." *Vestnik Mezhdunarodnoi Akademii Kholoda* 1 (2015): 69–74.

11. Eideyus, A. I., S. V. Koshelev, and M. Yu. Nikishin. "Heat transfer and pressure drop at refrigerant boiling in the plate coils." *Vestnik Mezhdunarodnoi Akademii Kholoda* 2 (2016): 42–47.

12. Gogolin, A. A., G. N. Danilova, V. M. Azarskov, and N. M. Mednikova. *Intensifikatsiya teploobmena v isparitelyakh kholodil'nykh mashin*. M.: Legkaya i pishch. prom-st', 1982.

13. Koshelev, C. V., A. I. Eideyus, and M. Yu. Nikishin. "Vliyanie uslovii vnutritrubnogo kipeniya khladagentov na vneshnyuyu neobratimost' v isparitelyakh." *Izvestiya KGTU* 42 (2016): 117–125.

14. Eideyus, A. I., S. V. Koshelev, and M. Y. Nikishin. "Pressure Drop in Coil Evaporators and Compressor Capacity." *Kompressornaya tekhnika i pnevmatika* 5 (2015): 14.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Кошелев Сергей Валерьевич — аспирант
Научный руководитель:
Ейдеюс Альгирдас Иозапович
ФГБОУ ВО «Калининградский государственный технический университет»
236022, Российская Федерация, Калининград, Советский проспект, 1
e-mail: *entermoria@rambler.ru*
Ейдеюс Альгирдас Иозапович —
кандидат технических наук, профессор
ФГБОУ ВО «Калининградский государственный технический университет»
236022, Российская Федерация, Калининград, Советский проспект, 1
e-mail: *xktk@bga.gazinter.net*

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Koshelev, Sergey V. — Postgraduate
Supervisor:
Eideyus, Algirdas I.
Kaliningrad State Technical University
1 Sovetskij Prospect, Kaliningrad, 236022, Russian Federation
e-mail: *entermoria@rambler.ru*
Eideyus, Algirdas I. —
PhD, professor
Kaliningrad State Technical University
1 Sovetskij Prospect, Kaliningrad, 236022, Russian Federation
e-mail: *xktk@bga.gazinter.net*

Статья поступила в редакцию 13 июля 2017 г.
Received: July 13, 2017.

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

DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-4-806-813

USE OF SOFTWARE AND HARDWARE MODELING FOR DESIGNING THE SHIP'S REFRIGERATION CONTROL SYSTEM

A. V. Vyngra, B. A. Avdeyev

Kerch State Marine Technological University,
Kerch, Republic of Crimea, Russian Federation

The paper considers the use of hardware-in-the-loop simulation to improve the design efficiency of control systems. Designing and adjustment of control systems are required experimental research, trial launches and other works, which are often difficult to implement, are costly and a large number of man-hours are spent on their implementation. Realization of work on real-time hardware and software complexes with partial use of control system equipment allows managing considerably less. Work can be carry out on software and hardware complexes of real time with partial use of control system equipment. The design of control systems based on the example of a ship's refrigerator control system. The design of the control system takes place using the working model of the refrigeration unit presented in the Matlab/Simulink mathematical modeling environment and consists of a refrigeration compartment, a mechanical subsystem and a control subsystem, which in turn includes a configuration setting block, a fluid property block and a coolant temperature setting block. Investigated control unit "Control" processes input signals that are the temperature mismatch value and temperature mismatch differential. The author proposed to replace the modeled control unit by the fpga-in-the-loop unit with the use of a field-programmable gate array developed by Xilinx. The technical characteristics of the proposed board are given. The results of modeling the operation of the automatic control system are present in the form of temperature of the refrigeration system versus time. The using of hardware-in-the-loop simulation increases the efficiency and accuracy of the process of creating control systems. It is determined that with the use of it is possible to calculate the time of the control signal transmission to the executive body, and envisage this factor in the designed system.

Keywords: hardware-in-the-loop simulation, design of control systems, ship refrigerator unit, field-programmable gate array (fpga).

For citation:
Vyngra, Alexei V., and Boris A. Avdeyev. "Use of software and hardware modeling for designing the ship's refrigeration control system." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 9.4 (2017): 806–813. DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-4-806-813.

УДК 681.5

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ПРОГРАММНО-АППАРАТНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ СУДОВОЙ ХОЛОДИЛЬНОЙ УСТАНОВКОЙ

А. В. Вынгра, Б. А. Авдеев

ФГБОУ ВО «Керченский государственный морской технологический университет»,
Керчь, Республика Крым, Российская Федерация

Рассматривается возможность применения программно-аппаратного моделирования для улучшения качества проектирования системы управления судовой холодильной установкой Проектирование и наладка систем управления требуют проведения экспериментальных исследований, пробных пусков и других работ, которые зачастую труднореализуемы, высокозатратны, и на их проведение затрачивается большое количество человеко-часов. Проведение работы на программно-аппаратных комплексах реального времени при частичном использовании оборудования системы управления позволяет обойтись значительно меньшими затратами. Целью исследования является улучшение эффективности проектирования путем определения действительных параметров холодильной установки. Объектом исследования является судовая холодильная установка. Выполнение работы происходит с использованием ра-

бочей модели холодильной установки, представленной в среде математического моделирования Matlab/ Simulink, состоящей из охлаждаемого помещения, механической подсистемы и подсистемы управления, которая, в свою очередь, включает блок задания конфигурации, блок свойства жидкости и блок задания температуры охладителя. Исследуемый в модели блок управления «Control» обрабатывает входные сигналы, которыми являются рассогласование температур и дифференциал рассогласования температур, и на выход отправляет управляющий сигнал. Предложено заменить смоделированный блок управления программно-аппаратной частью с применением программируемой логической интегральной схемы фирмы Xilinx. В работе приведены технические характеристики предлагаемой к применению платы. Изучены принципы генерирования HDL- кода для программирования отладочной интегральной схемы. Произведено моделирование с применением программно-аппаратной части в модели и при наличии только смоделированного блока управления холодильной установкой, приведены сравнительные характеристики полученных результатов моделирования. Результаты моделирования работы системы автоматического управления представлены в виде графиков изменения температуры холодильной установки с течением времени. Определено, что с помощью программно-аппаратного моделирования можно рассчитать действительное время передачи управляющего сигнала на исполнительный орган и предусмотреть этот фактор при создании системы управления. Установлено, что в случае применения программно-аппаратного моделирования при проектировании сложных систем управления увеличиваются эффективность и точность процесса создания систем управления.

Ключевые слова: программно-аппаратное моделирование, судовая холодильная установка, проектирование систем управления, программируемая логическая интегральная схема.

Для цитирования:
Вынгра А. В. Использование программно-аппаратного моделирования при проектировании системы управления судовой холодильной установкой / А. В. Вынгра, Б. А. Авдеев // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2017. — Т. 9. — № 4. — С. 806–813. DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-4-806-813.

Введение

Проблемы разработки современных систем управления для различных электронных электромеханических устройств непосредственно связаны с задачами моделирования реальных физических объектов, с проектированием систем управления, с тестированием и созданием рабочих прототипов. Для различного рода систем управления требуется персонал, обеспечивающий их обслуживание, а от самих систем, в свою очередь, требуется высокая точность и скорость работы. Следовательно, целесообразно задаться вопросами: каким образом можно уменьшить количество работающего персонала, сделав систему автоматического управления более автономной, и каким образом можно уменьшить затраты, связанные с неточностями работы систем автоматического управления.

В решении поставленной проблемы поможет использование программно-аппаратного моделирования (ПАМ), которое использует некоторые параметры работы реальной системы и позволяет изменять параметры проектируемой системы управления. ПАМ представляет собой метод, который используется в разработке и испытании сложных встроенных систем реального времени. ПАМ обеспечивает эффективную платформу моделирования при помощи добавления внешней системы управления для тестирования проектируемой системы. Это математическое представление называют *программным моделированием*.

В настоящее время большинство систем автоматического управления имеют возможность изменять параметры управления при работе непосредственно на установке. Исследование возможностей применения ПАМ при проектировании систем управления даст возможность предусмотреть некоторые параметры работы установки. Таким образом, не имея доступа к реальной проектируемой или модернизируемой установке, ПАМ позволит обеспечить моделирование работы некоторых подсистем установки в условиях, приближенных к реальным, что даст возможность эффективнее производить настройку параметров системы управления на этапе ее проектирования.

Методы и материалы

В научных публикациях отечественных и зарубежных авторов, посвященных вопросам моделирования систем управления, последние десять лет актуальной является тема исследования и совершенствования современных систем управления различными судовыми устройствами и установками. В статье [1] описываются принципы моделирования сетевых систем управления в среде моделирования Simulink. Автор статьи [2] рассматривает вопросы возможности проектирования сложных систем управления с использованием программируемых логических интегральный схем фирмы *Xilinx*. В статье [3] авторы рассматривают программно-аппаратный симулятор силовой части электропривода, реализованный на основе средств фирмы *National Instruments*, также проведен анализ точности расчета, выполняемого на программируемой логической интегральной схеме (ПЛИС), на примере математического моделирования асинхронного электродвигателя. В статье [4] рассмотрены вопросы проектирования электронной аппаратуры с использованием микросхем фирмы *Xilinx* и предложены практические рекомендации по проектированию печатной платы, организации системы питания, программированию и сопряжению с периферийными устройствами.

ПАМ выполняется с помощью ПЛИС фирмы *Atlys* на базе микропроцессора Xilinx Spartan-6. Программирование платы производится в среде математического моделирования Matlab/Simulink с использованием подпрограммы HDL-coder. Язык написания программы — Verilog.

Особенности платы:

– микропроцессор — Xilinx Spartan-6 LX45 FPGA, пакет BGA 324-контактный;

– оперативная память — 128 MB DDR2 16-битное хранение данных;

– четыре блока памяти по 16 МБ с встроенным SPI протоколом для конфигурации и хранения данных;

– 100 МГц КМОП генератор частот;

– в режиме реального времени отслеживает мощность на всех шинах питания;

– интерфейсы программирования JTAG, совместимые с Xilinx в Impact и Digilent Adept;

– разъем RJ-45 для подключения 10/100/100 Ethernet PHY и RS-23;

– два входных порта видео HDMI и два выходных порта HDMI;

– AC-97 кодек с линейным входом, линейным выходом, микрофоном;

– два USB2-порта для программирования и передачи данных;

– один VMOD (высокоскоростной VHDC) разъем;

– USB-UART и USB-HID-порт (для мыши / клавиатуры);

– GPIO, включающий в себя 8 светодиодов, 6 кнопок, 8 слайдов-переключателей;

– 48 свободных входов/выходов.

Обзор модели для тестирования

Для определения преимуществ использования ПАМ проанализируем его работу, используя модель холодильной установки. Модель представлена в среде математического моделирования Matlab/Simulink. (LicenseNo: 271282). Модель холодильной установки (рис. 1) состоит из следующих подсистем.

1. Охлаждаемое помещение (Refrigeation Compartment).

2. Механическая подсистема (через все компоненты данной подсистемы осуществляется поток хладагента) имеет четыре смоделированных блока для основных компонентов подсистемы:

– компрессор (Compressor);

– конденсатор (Condenser);

– расширительный клапан (Expansion valve);

– испаритель (Evaporator).

3. Подсистема управления — состоит из блока задания конфигурации (Solver Configuration), блока свойств жидкости (Fluid Properties) и блока задания температуры охладителя (Target Refrigeration Temperature) [3], [5] – [7].

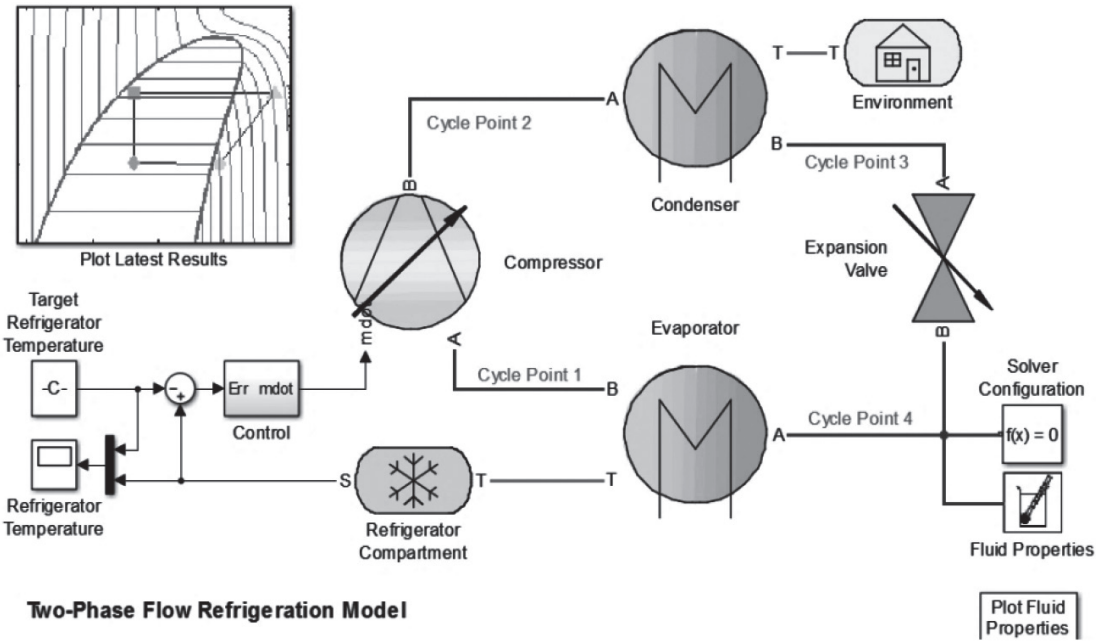


Рис. 1. Модель холодильной установки в среде Matlab/Simulink

От производительности компрессора зависит скорость выполнения цикла охлаждения и производительность системы охлаждения соответственно, поэтому для управления холодильной установкой требуется изменять производительность компрессора [8] – [10]. За изменение производительности компрессора отвечает подсистема управления «Control». Таким образом, существует возможность смоделировать работу холодильной установки при наличии в модели аппаратной части, выполняющей функции подсистемы управления. Далее сравним скорость работы системы при непосредственном нахождении подсистемы «Control» в модели установки и при ее нахождении на программируемой плате.

Применение ПАМ для рассмотренной модели

Для того чтобы добавить аппаратную часть в модель, выполняется следующая последовательность.

1. Создание HDL-кода для подсистемы регулирования (рис. 2). Для этого требуется выполнить встроенную в Simulink функцию «Generate HDL for subsystem…». Программа сгенерирует код и поместит его в архив расширением .vhd в корневую папку редактируемой модели.

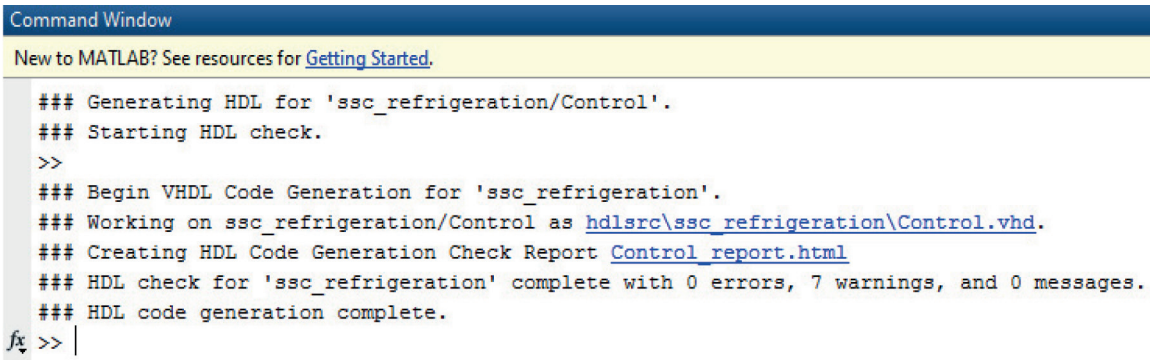


Рис. 2. Командное окно с описанием процесса создания HDL-кода для подсистемы «control»

2. Создание блока FPGA-in-the-loop (далее FIL) и необходимых файлов для программирования платы [11], [12]. Создается блок, который заменит подсистему управления аппаратной частью

в модели. Для создания данного блока воспользуемся утилитой FPGA-in-the-loop Wizard. В окне специальных опций указываем MAC-адрес и IP-адрес подключаемой платы.

Далее программа сама создает FIL блок (рис. 3), который необходимо поместить в модель, предварительно убрав из цикла подсистему «Control».

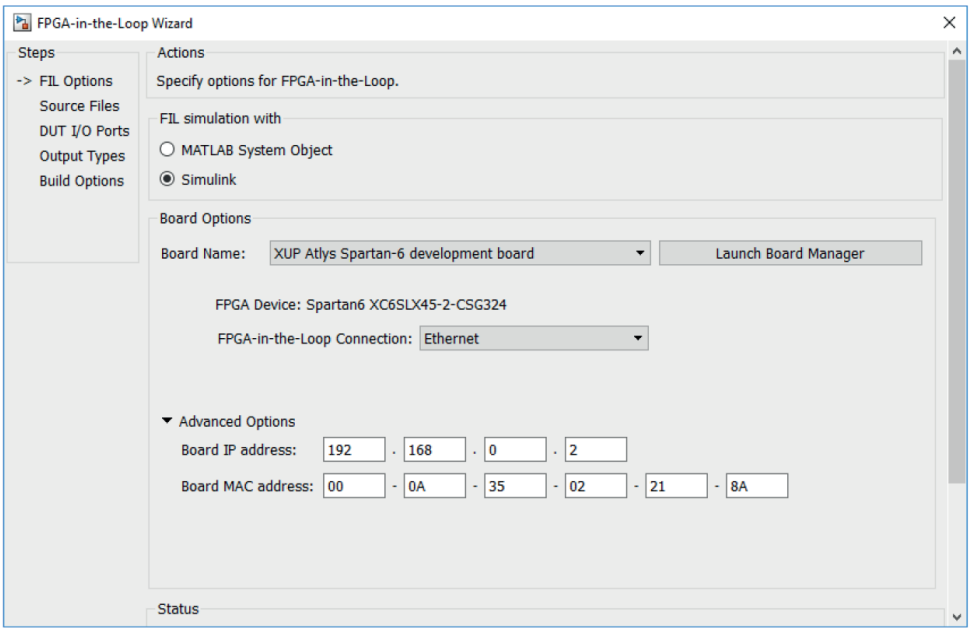


Рис. 3. Окно создания блока FPGA-in-the-loop

3. Запись программы управления на плату. Осуществляется через интерфейс JTAG подключением к порту USB.

4. Отладка модели. Связь модели с аппаратной частью осуществляется по протоколам интерфейса связи Ethernet. Подключаем плату к ПК через разъем стандарта RG-45 и производим процесс моделирования установки.

Результаты

Отладка модели была произведена с применением следующих параметров холодильной установки и хладагента:

а) параметры хладагента:

– тип хладагента: R134a;

– плотность, жидкая фаза: 1,206 кг/л;

– скрытая теплота испарения в точке кипения: 217,1 кДж/кг;

– молекулярный вес: 102 г/моль;

– теплопроводность, газообразная фаза: 0,0145 Вт/ (м · °С);

– точка кипения при 1 бар: –26,1 °С;

– точка кристаллизации: –101 °С.

б) параметры холодильной установки:

– площадь охлаждаемого помещения 10 м^2.

При отладке модели без использования ПАМ имеем следующие результаты:

– время отладки для полного цикла выполнения модели — 60 с;

– скорость передачи информации с подсистемы управления на модель — 1 Мб/с.

Для случая с применением аппаратной части в модели холодильной установки получены следующие результаты:

– время отладки для полного цикла выполнения модели — 40 с;

– скорость передачи информации с подсистемы управления на модель — 0,8 Мб/с.

Полученные данные моделирования в виде графиков изменения температуры холодильной установки приведены на рис. 4 (сплошная линия — температура холодильной установки, пунктирная — заданная температура). Модель выполняет стандартный цикл двухпозиционного регулирования температуры.

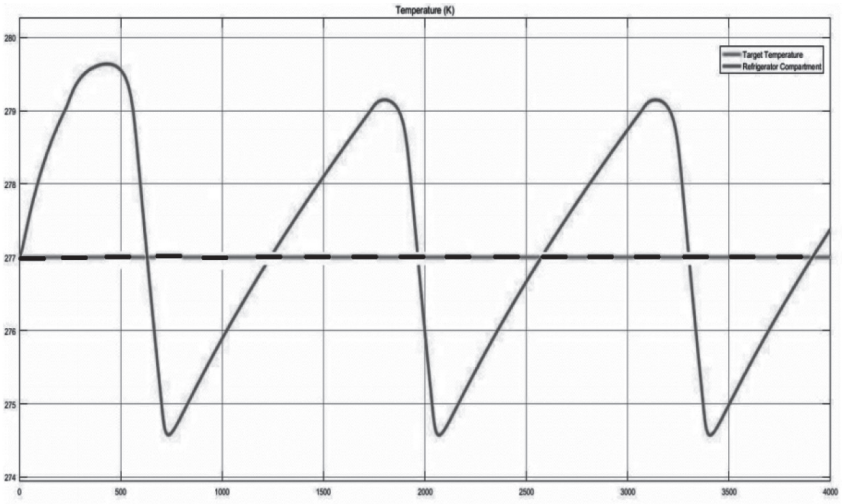


Рис. 4. Результаты моделирования работы системы автоматического управления: изменение температуры холодильной установки с течением времени

Обсуждение

При отладке модели с использованием ПАМ и при стандартной отладке были получены одинаковые графики изменения температуры в холодильной установке, поэтому можно заключить, что применение программного аппаратного моделирования не влияет на выходные результаты работы модели. Из результатов следует, что с использованием в модели аппаратной части процесс моделирования происходит быстрее, так как программное обеспечение Matlab/Simulink лишается некоторых процессов, выполняемых на внешней плате. Однако следует отметить, что увеличивается время передачи информации с системы управления на модель, что объясняется наличием физических связей.

Заключение

Проведенное исследование показало несомненную эффективность использования ПАМ на этапе проектирования систем управления. Исходя из результатов моделирования, можно сделать вывод, что применение ПАМ при проектировании сложных систем управления увеличивает эффективность и точность процесса создания систем управления. Результаты показали, что применение ПАМ в модели холодильной установки позволило сократить время отладки для полного цикла выполнения модели с 60 с до 40 с. Также использование ПАМ в производстве обеспечивает возможность уменьшения количества сетевых связей между системами управления и исполнительными органами путем введения аппаратной части вблизи исполнительного органа. С помощью ПАМ возможно рассчитать время передачи управляющего сигнала на исполнительный орган, и в проектируемой системе предусмотреть этот фактор.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Трофус М. В.* Моделирование в системе структурного и имитационного моделирования Simulink / М. В. Трофус, А. П. Кирпичников, И. М. Якимов // Вестник Казанского технологического университета. — 2017. — Т. 20. — № 8. — С. 107–110.

2. *Тарасов И.* Разработка цифровых систем на базе FPGA Xilinx начального уровня / И. Тарасов // Компоненты и технологии. — 2015. — № 3 (164). — С. 56–62.

3. *Зюзев А. М.* FPGA-симулятор реального времени электропривода переменного тока / А. М. Зюзев, М. В. Мудров, К. Е. Нестеров // Энергетика. Инновационные направления в энергетике. CALS-технологии в энергетике. — 2014. — № 1. — С. 229–238.

4. *Аверченко А. П.* Использование математических пакетов Matlab & Simulink при разработке цифровых фильтров / А. А. Аверченко, А. Ю. Медведков, Ж. Б. Садыков. // Технические науки в России и за рубежом: материалы III Междунар. науч. конф. (г. Москва, июль 2014 г.). — М.: Буки-Веди, 2014. — С. 24–26.

5. *Вынгра А. В.* Модернизация модели судовых холодильных установок применением нечеткой логики для регулирования температуры / А. В. Вынгра // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Морская техника и технология. — 2017. — № 2. — С. 60–68. DOI: 10.24143/2073-1574-2017-2-60-68.

6. *Черный С. Г.* Повышение производительности микропроцессорной сети управления на платформе Ethernet для системы буровых комплексов / С. Г. Черный // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. — 2016. — № 1. — С. 2–10.

7. *Черный С. Г.* Задача создания системы управления рисками для сложных систем морских платформ / С. Г. Черный // Оборудование и технологии для нефтегазового комплекса. — 2016. — № 1. — С. 55–61.

8. *Зотов В.* Создание проекта встраиваемой системы на основе микропроцессорного ядра семейства PicoBlaze / В. Зотов // Компоненты и технологии. — 2005. — № 52. — С. 178–182.

9. *Ahmadeev E.* The Virtual Test Bench of Medium Voltage Controlled AC Drives / E. Ahmadeev, D. Beliaev, E. Ilijin, A. Weinger // Proc. 15th IASTED Int. Conf. on Applied Simulation and Modelling ASM-2006. — 2006. — Pp. 340–345.

10. Применение FPGA в промышленных системах управления электроприводом [Электронный ресурс]. — Режим доступа: http://www.russianelectronics.ru/leader-r/review/40498/doc/47909/ (Дата обращения: 20.06.2017).

11. *Bolsens I.* Challenges and opportunities for FPGA platforms / I. Bolsens // Lecture notes in computer science. — 2002. — Pp. 391–392.

12. *Akgul A.* Chaos-based engineering applications with a 3d chaotic system without equilibrium points / A. Akgul, I. Pehlivan, H. Calgan, I. Koyuncu, A. Istanbullu // Nonlinear dynamics. — 2016. — Vol. 84. — Is. 2. — Pp. 481–495. DOI: 10.1007/s11071-015-2501-7.

REFERENCES

1. Trofus, M. V., A. P. Kirpichnikov, and I. M. Yakimov. “Modelirovanie v sisteme strukturnogo i imitatsionnogo modelirovaniya Simulink.” *Vestnik Kazanskogo tekhnologicheskogo universiteta* 20.8 (2017): 107–110.

2. Tarasov, I. “Razrabotka tsifrovykh sistem na baze FPGA Xilinx nachal’nogo urovnya.” *Komponenty i tekhnologii* 3(164) (2015): 56–62.

3. Ziuzev, A. M., M.V. Mudrov, and K. E. Nesterov. “FPGA-based real-time software-hardware simulation of the electric drives.” *Energetika. Innovatsionnye napravleniya v energetike. CALS-tekhnologii v energetike* 1 (2014): 229–238.

4. Averchenko, A. P., A. Yu. Medvedkov, and Zh. B. Sadyikov. “Ispolzovanie matematicheskih paketov Matlab & Simulink pri razrabotke tsifrovyih filtrov.” *Tehnicheskie nauki v Rossii i za rubezhom: materialyi III Mezhdunar. nauch. konf.* M.: Buki-Vedi, 2014: 24–26.

5. Vyngra, Alexei Viktorovich. “Modernization of the model of ship refrigeration units using fuzzy logic for temperature control.” *Vestnik of Astrakhan State Technical University. Series: Marine Engineering and Technologies* 2 (2017): 60–68. DOI: 10.24143/2073-1574-2017-2-60-68.

6. Chernyi, S. G. “Improving performance of microprocessor network management platform for Ethernet systems drilling rigs.” *Instruments and Systems: Monitoring, Control, and Diagnostics* 1 (2016): 2–10.

7. Cherny, Sergey Grigorievich. “Development of the risk management system for complex systems of offshore platforms.” *Oborudovanie i tekhnologii dlya neftegazovogo kompleksa* 1 (2016): 55–61.

8. Zotov, V. “Sozdanie proekta vstraivaemoy sistemyi na osnove mikroprotsessornogo yadra semeystva PicoBlaze.” *Komponentyi i tehnologii* 52 (2005): 178–182.

9. Ahmadeev, E., D. Beliaev, E. Ilijin, and A. Weinger. “The virtual test bench of medium voltage controlled AC drives.” *Proc. 15th IASTED Int. Conf. on Applied Simulation and Modelling ASM-2006*. 2006.

10. Primenenie FPGA v promyshlennykh sistemakh upravleniya elektroprivodom. Web 20 June 2017 <http://www.russianelectronics.ru/leader-r/review/40498/doc/47909/>.

11. Bolsens, Ivo. "Challenges and opportunities for FPGA platforms." *Lecture notes in computer science* (2002): 391–392.

12. Akgul, Akif, I. Pehlivan, H. Calgan, I. Koyuncu, and A. Istanbullu. "Chaos-based engineering applications with a 3D chaotic system without equilibrium points." *Nonlinear Dynamics* 84.2 (2016): 481–495. DOI: 10.1007/s11071-015-2501-7.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Вынгра Алексей Викторович — ассистент
ФГБОУ ВО «Керченский государственный
морской технологический университет»
298309, Российская Федерация, Республика Крым,
г. Керчь, ул. Орджоникидзе, 82
e-mail: *elag1995@gmail.com*

Авдеев Борис Александрович —
кандидат технических наук, доцент
ФГБОУ ВО «Керченский государственный
морской технологический университет»
298309, Российская Федерация, Республика Крым,
г. Керчь, ул. Орджоникидзе, 82
e-mail: *dirigeant@mail.ru*

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Vyngra, Alexei V. — Assistant
Kerch State Marine
Technological University
82 Ordzhonikidze Str., Kerch, 298309,
Republic of Crimea, Russian Federation
e-mail: *elag1995@gmail.com*

Avdeyev, Boris A. —
PhD, associate professor
Kerch State Marine
Technological University
82 Ordzhonikidze Str., Kerch, 298309,
Republic of Crimea, Russian Federation
e-mail: *dirigeant@mail.ru*

Статья поступила в редакцию 13 июля 2017 г.
Received: July 13, 2017.

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

DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-4-814-828

IMPROVEMENT EFFICIENCY OF LASER STRENGTHENING OF IRON DETAILS SHIP'S POWER PLANTS

I. I. Kuleshov, V. M. Khodakovskiy

Maritime State University named after admiral G.I. Nevelskoi,
Vladivostok, Russian Federation

The influence of the plastic deformation method with the modification of the nanostructural layer on the change in the microhardness and the surface structure of the part made of gray pearlitic cast iron is considered. This method is considered for a part whose surface was pre-reinforced by the laser processing method with reflow. A special feature of this method is the considerable depth of the hardening zone (up to 1 mm). The disadvantage of laser hardening with spalling is the presence of a large amount of residual austenite (30-50%) in the zone of laser action. The reinforced layer can be subjected to further hardening operations in order to increase the hardness of the laser exposure zone. A method that allows further hardening of the laser exposure zone is the method of plastic deformation with modification of the nanostructured layer of the laser action zone.

The analysis of changes in microhardness and structure is performed depending on the load on the sample, the speed and the time of sample processing. The research was carried out in stages. Analysis of the dependence of micro-hardness and structure upon changing the load from 10 to 45 N/mm2 made it possible to establish that the optimal value of the load is 25 N/mm2. Analysis with a change in the processing speed from 0.1 to 1.5 m/s made it possible to establish that the optimal value of the processing speed is 0.3 m/s. Analysis of the dependence upon changing the processing time from 100 to 500 s allowed us to establish that the optimal value of the processing time is 300 s.

In the process of plastic deformation of the laser action zone in the contact zone, the original structure is transformed into a «white phase», characterized by high parameters of microhardness. The highest value of the microhardness of the «white phase» obtained during the experiment reaches more than 1200 HV.

Mathematical analysis in the form of a full factorial experiment 2^3 allows one to obtain an expression relating the microhardness of the «white phase» to the technological regimes of plastic deformation.

Keywords: plastic deformation, modification of the nanostructured layer, change in microhardness, laser hardening with reflow, gray pearlitic cast iron, load change, processing speed, processing time, white phase, technological regimes of plastic deformation, mathematical analysis.

For citation:
Kuleshov, Igor I., and Vladimir M. Khodakovskiy. "Improvement efficiency of laser strengthening of iron details ship's power plants." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 9.4 (2017): 814–828. DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-4-814-828.

УДК 669:629.5.083.5

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ЛАЗЕРНОГО УПРОЧНЕНИЯ ЧУГУННЫХ ДЕТАЛЕЙ СУДОВЫХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВОК

И. И. Кулешов, В. М. Ходаковский

Морской государственный университет имени адмирала Г. И. Невельского,
Владивосток, Российская федерация

В работе рассмотрено влияние метода пластического деформирования с модификацией наноструктурного слоя на изменение микротвёрдости и структуры поверхности детали, выполненной из серого перлитного чугуна. Данный метод рассматривается применительно к детали, поверхность которой предварительно была упрочнена методом лазерной обработки с оплавлением. Особенностью данного метода является значительная глубина зоны упрочнения (до 1 мм). Недостатком лазерного упрочнения с оплавлением является наличие большого количества остаточного аустенита (30 – 50 %) в зоне лазерного воздействия. Упрочнённый слой может быть подвергнут дальнейшим упрочняющим операциям с целью повышения твёрдости зоны лазерного воздействия. Методом, позволяющим произвести дальнейшее упрочнение

зоны лазерного воздействия, является метод пластического деформирования с модификацией наноструктурного слоя зоны лазерного воздействия.

Выполнен анализ изменения микротвёрдости и структуры в зависимости от нагрузки на образец, скорости и времени обработки образца. Исследования проводились поэтапно. Анализ зависимости микротвёрдости и структуры при изменении нагрузки от 10 до 45 Н/мм^2 позволил установить, что оптимальной величиной нагрузки является значение 25 Н/мм^2. Анализ при изменении скорости обработки от 0,1 до 1,5 м/с позволил установить, что оптимальной величиной скорости обработки является значение 0,3 м/с. Анализ зависимости при изменении времени обработки от 100 до 500 с позволил установить, что оптимальной величиной времени обработки является значение 300 с.

В процессе пластического деформирования зоны лазерного воздействия в зоне контакта происходит преобразование исходной структуры в «белую фазу», характеризующуюся высокими параметрами микротвёрдости. Наибольшее значение микротвёрдости «белой фазы», полученной в ходе эксперимента, составляет более 1200 HV.

Математический анализ в виде полного факторного эксперимента 2^3 позволяет получить выражение, связывающее микротвёрдость «белой фазы» с технологическими режимами пластического деформирования.

Ключевые слова: пластическое деформирование, модификация наноструктурного слоя, изменение микротвёрдости, лазерное упрочнение с оплавлением, серый перлитный чугун, изменение нагрузки, скорость обработки, время обработки, белая фаза, технологические режимы пластического деформирования, математический анализ.

Для цитирования:
Кулешов И. И. Повышение эффективности лазерного упрочнения чугунных деталей судовых энергетических установок / И. И. Кулешов, В. М. Ходаковский // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2017. — Т. 9. — № 4. — С. 814–828. DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-4-814-828.

Введение (Introduction)

Для изготовления большинства ответственных литых деталей судовых энергетических установок (СЭУ) применяется серый чугун (СЧ). К таким деталям можно отнести маслоты для поршневых колец двигателей внутреннего сгорания (ДВС), втулки цилиндров ДВС и компрессоров, шевронные колёса грузовых лебёдок и т. д. [1]. В процессе работы трущиеся сопряжённые поверхности чугунных деталей, работающих как на трение, так и на ударные нагрузки, подвержены интенсивному износу вследствие накопленных остаточных напряжений. СЧ представляет собой сплав железа с большим количеством углерода (≥ 2,14 %). В структуре СЧ присутствует графит, который, ввиду своей низкой твёрдости, можно определить, как пустоты в структуре металла. Данная особенность обуславливает высокую хрупкость чугуна. Ввиду этого СЧ применяют в основном для деталей, работающих на сжатие. С целью повышения прочности и износостойкости таких деталей существует ряд методов, позволяющих значительно повысить эксплуатационные характеристики таких деталей. Все методы можно разделить на следующие группы:

– легирование с изменением химического состава;

– модифицирование чугуна в жидком состоянии графитизирующими присадками;

– термическая обработка;

– упрочнение рабочих поверхностей технологическими методами [1].

Методы повышения прочности металла путём изменения его химического состава значительно усложняют его технологию изготовления. Также зачастую требуется упрочнять не весь объём металла, а только его рабочую поверхность. Следовательно, наибольший интерес представляет метод упрочнения рабочих поверхностей технологическими методами. К таким методам можно отнести:

– поверхностно-пластическое деформирование (ППД) [2];

– лазерное упрочнение без оплавления рабочей поверхности [3], [4] и с её оплавлением [5];

– пластическое деформирование с модификацией структурных слоёв путём интенсивной пластической деформации (трением в контролируемой среде, дробеструйной обработкой, пескоструйным или ударным наклёпом) [6] – [8].

Методы упрочнения ППД характеризуются значительными величинами глубины упрочнённого слоя (до 7 мм). При этом важно отметить, что при нагреве деталей, упрочнённых методом ППД, до температур от 300 °С и выше происходит релаксация деформированного слоя, следствием чего является снижение твёрдости упрочнённой поверхности.

Лазерное упрочнение без оплавления характеризуется небольшой глубиной зоны упрочнения (до 0,3 мм), однако высокими параметрами микротвёрдости зоны обработки (700 – 900 HV). Лазерное упрочнение с оплавлением поверхности сопровождается бóльшим значением глубины упрочнённой зоны (до 1 мм). Однако упрочнение с оплавлением характеризуется большим количеством остаточного аустенита в зоне оплавления (30 – 50 %), микротвёрдость которого колеблется в пределах от 500 до 600 HV, а микротвёрдость остальной упрочнённой зоны в зависимости от микроструктуры варьируется в пределах от 60 до 800 HV [4], [5].

Методы пластического деформирования с модификацией структурных слоёв заключаются в формировании наноструктурного состояния в поверхностной области. Полученная зона упрочнения определена как «белая фаза» и характеризуется повышенной твёрдостью и износостойкостью, но глубина упрочнённой зоны сравнительно невелика и составляет 40 – 60 мкм, а исходная объёмная структура с частично деформированными слоями составляет 60 – 110 мкм. При этом твёрдость упрочнённых наноструктурных слоёв варьируется в пределах от 800 до 1000 HV [9].

Цель работы состоит в определении влияния пластического деформирования на изменение микротвёрдости и структуры зоны лазерного воздействия при обработке чугунных деталей с оплавлением поверхности.

Методы и материалы (Methods and Materials)

В качестве исходного образца использовался образец прямоугольного сечения, размеры которого составляют 10 × 10 × 30 мм. Материал образца — серый чугун СЧ30, ГОСТ 1412-85, следующего химического состава: C = 3,16 %, Si = 1,6 %, Mn = 0,8 %, S = 0,1 %, P = 0,1 %.

Исследования исходной структуры чугуна по графиту и металлической основе (по ГОСТ 3443-87) показали, что в структуре имеется пластинчатый графит (ПГ пластинчатый), форма графита — прямолинейная пластинчатая (ПГф1), распределение графита — веточное (ПГр5), размер включений варьируется от 500 до 1000 мкм (ПГд750), количество графита 8 – 12 % (ПГ10). Форма и распределение графита приведены на рис. 1.



Рис. 1. Форма и распределение графита, ×50

Металлическая структура имеет вид пластинчатого перлита (Пт1) с содержанием перлита 90 – 94 % (П92), дисперсность перлита достигает 0,3 мкм (Пд0,3). Микроструктура металлической основы представлена на рис. 2 и 3.



Рис. 2. Микроструктура металлической основы чугуна, ×500

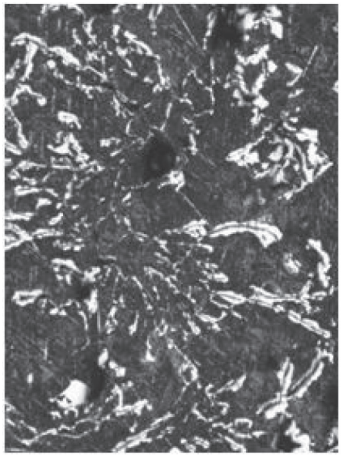


Рис. 3. Участки со структурой П + Ф + Г, ×50

В структуре металла присутствуют включения ледебурита (рис. 4). Содержание 5 – 10 % (Ц10). Площадь изолированного включения находится в пределах от 10000 до 16000 мкм^2 (Цп13000).

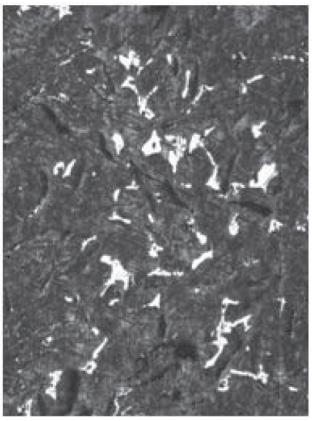


Рис. 4. Участки со структурой П + Г + Л, ×50

Результаты определения структуры: структура серого чугуна с равномерно распределенными включениями пластинчатого графита прямолинейной формы, длина отдельного включения 250 – 500 мкм; металлическая основа — перлит пластинчатый в количестве от 90 % с межпластинчатым расстоянием до 0,3 мкм; площадь занятая ледебуритом 5 – 15 мкм^2, площадь наибольшего включения ледебурита —10000 – 16000 мкм^2:

ПГф1 – ПГр5 – ПГд750 – ПГ10 – Пт1 – П92 – Пд0,3 – Ц10 – Цп13000.

В металлической основе материала присутствуют включения цементита ледебурита, обладающие высокой твёрдостью, варьирующей от 700 до 950 HV. Твёрдость металлической основы составляет 300 HV. В качестве контртела использовался диск, диаметром 42 мм, шириной — 10 мм. Образец выполнен из стали 45 ГОСТ 1050-88. Химический состав: C = 0,44 %, Si = 0,3 %, Mn = 0,7 %, Ni = 0,2 %, S = 0,023%, P = 0,015 %, Cr = 0,1 %, Cu = 0,17 %, As = 0,05 %, Fe — остальное.

Исследование проводилось с целью установления связей между нагрузкой — F, Н/мм^2, оказываемой контртелом на образец, временем обработки — t, с, и скоростью обработки контртелом — V, м/с. Перед обработкой трением образец был подвержен лазерной обработке с оплавлением поверхности.

Лазерное упрочнение с оплавлением поверхности проводили на установке «Комета-2». Режимы лазерного упрочнения:

– мощность излучения — 1,2 кВт;
– диаметр лазерного луча — 4 мм;
– скорость перемещения луча — 0,02 м/с.

Упрочнение пластическим деформированием выполнялось по схеме «диск – колодка» (трение скольжения) и проводилось на универсальной машине трения с высокотемпературной камерой. Регулировка рабочих параметров производилась на преобразователе частоты с управлением вектора потока EI-9011. Обработка проводилась при следующих режимах:

– нагрузка F — 10 – 45 Н/мм^2;
– скорость обработки контртелом V — 0,1 – 1,5 м/с;
– время обработки t — 100 – 500 с.

В процессе обработки контролировалось изменение микроструктуры и твёрдость микроструктуры в зоне контакта.

Металлографическое исследование проводилось на микроскопе Leica DM4000 M при увеличениях от ×50 до ×1000 раз до травления и после травления в 4 %-м растворе азотной кислоты в спирте. Измерение твёрдости проводилось на микротвердомере МНТ-10 при нагрузке 150 Н и увеличении ×500.

Результаты (Results)

После определения исходной структуры образец подвергался лазерному упрочнению с оплавлением поверхности. Общий вид зоны лазерного воздействия, полученной в режиме оплавления, показан на рис. 5.



Рис. 5. Общий вид ЗО, ×50

Размеры зоны лазерного воздействия, мкм:
общая глубина зоны лазерного воздействия (ЗЛВ) — 812,5;
глубина зоны оплавления (ЗО) — 213,25;
глубина зоны термического воздействия (ЗТВ) — 701 – 730;
ширина зоны лазерного воздействия — 4318,75;
ширина зоны оплавления — 2856,25.

Микроструктура на границе между зоной оплавления и зоной термического влияния показана на рис. 6.

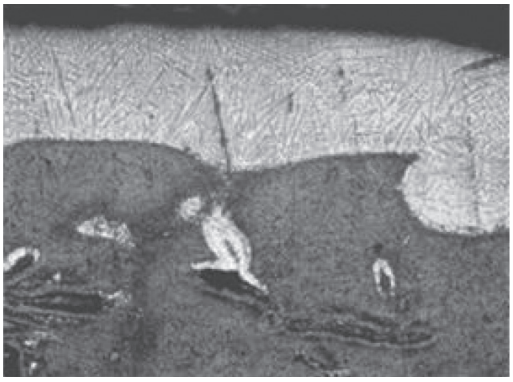


Рис. 6. Микроструктура на границе между ЗО и ЗТВ, ×500



Рис. 7. Ледебурит с ячейками аустенита ЗО, ×1000

Включения ледебурита имеют микротвёрдость 600 – 800 HV. Ледебурит с ячейками аустенита имеет микротвёрдость 800 – 900 HV (рис. 7).

Металлическая основа чугуна в зоне термического влияния темно-серого цвета, она закалена на мартенсит со средней микротвердостью 600 HV. Микротвердость участков, в которых произошли подплавление ФЭ и структурные превращения, колеблется в пределах 600 – 900 HV. На тех участках, где образовался мартенсит + аустенит остаточный, микротвердость составляет 500 – 700 HV, а где образовался ледебурит + мартенсит + аустенит остаточный — 700 – 950 HV.

Начальным этапом исследования влияния пластического деформирования на изменение микротвёрдости и структуры ЗЛВ явилось установление появления белой фазы в ЗЛВ при пластическом деформировании. При этом в качестве контртела был выбран стандартный круглый образец диаметром 42 мм, выполненный из стали. Процесс проводился при установлении следующих параметров: V = 0,2 м/с; t = 300 с; нагрузка F изменялась в пределах от 10 до 45 Н/мм^2. С целью получения более достоверной информации проводилось два параллельных опыта.

При обработке в зоне контакта трущихся поверхностей образуется белая фаза, обладающая повышенной твёрдостью и высокой однородностью. Данная структура образуется в ЗО из структуры, представленной ледебуритом с ячейками аустенита. Изменение микроструктуры зоны оплавления при увеличении величины нагрузки приведено на рис. 8.

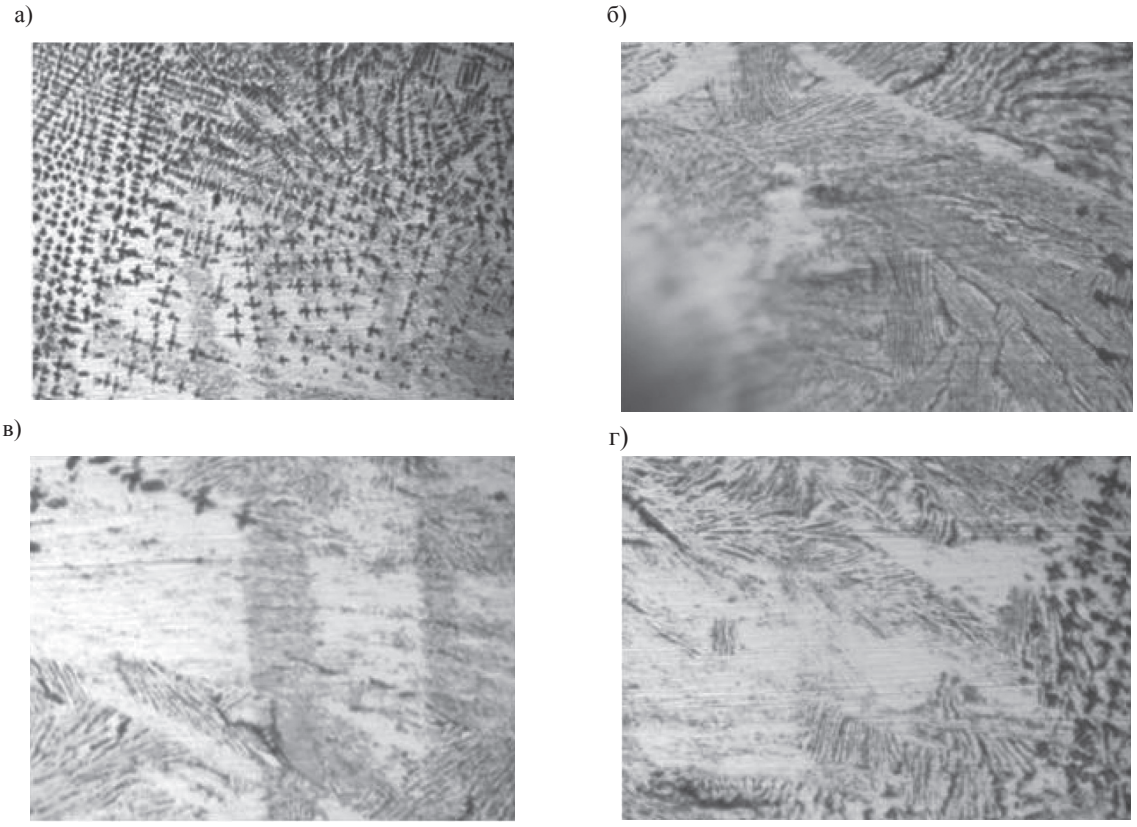


Рис. 8. Состояние микроструктуры БФ при различных значениях нагрузки:
а — при F = 10 Н/мм^2, ×500, ×1,5; *б* — при F = 20 Н/мм^2, ×1000;
в — при F = 30 Н/мм^2, ×1000; *г* — при F = 40 Н/мм^2, ×1000

Определено, что наиболее однородная структура «белой фазы» (БФ) образуется при F = 25 Н/мм^2. После определения изменения структуры определялось изменение микротвёрдости ЗО. На основании полученных данных был построен график зависимости микротвёрдости (HV) БФ от изменения нагрузки (F), представленный на рис. 9, *а*. Полученная зависимость позволяет сделать вывод о том, что значительные изменения микротвёрдости наблюдались при изменении нагрузки от 10 до 25 Н/мм^2.

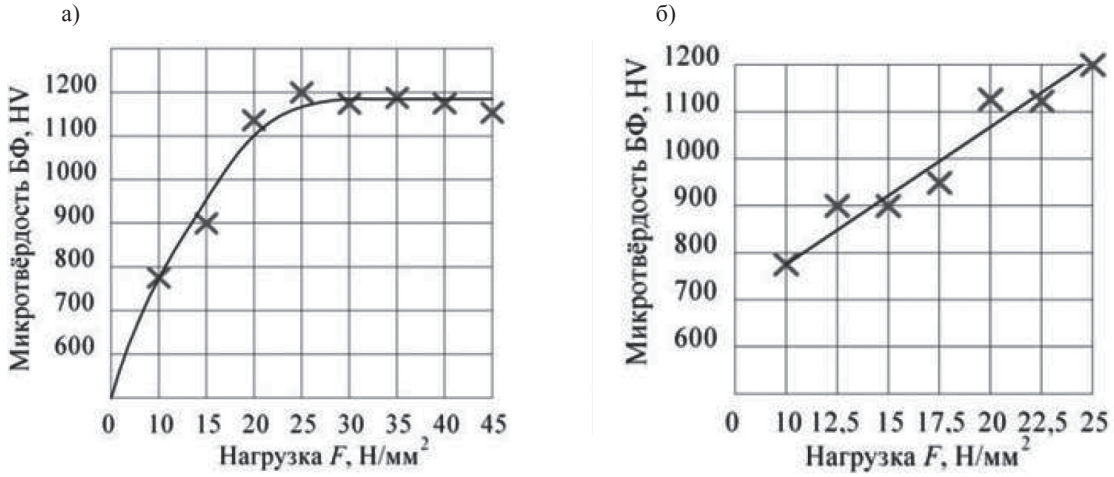


Рис. 9. Графики зависимости микротвердости БФ от нагрузки:
а — основной; *б* — дополнительный

Дальнейшее увеличение нагрузки ведёт к образованию точки перегиба графика. При этом микротвёрдость принимает относительно постоянное значение. Следовательно, увеличение нагрузки более 25 Н/мм^2 не приведёт к увеличению микротвёрдости БФ. При изменении нагрузки от 10 до 25 Н/мм^2 построенные точки собраны вдоль прямой линии, поэтому можно предположить положительную линейную связь между микротвёрдостью и нагрузкой. Для уточнения данной связи проводилось дополнительное исследование, в котором были введены дополнительные параметры нагрузки: 12,5 Н/мм^2, 17,5 Н/мм^2, 22,5 Н/мм^2. Полученная зависимость приведена на рис. 9, *б*.

Дополнительное исследование показало, что при изменении нагрузки в диапазоне 10 – 25 Н/мм^2 построенные точки не находятся точно на линии, но собраны вдоль прямой линии, поэтому можно предположить, что связь между параметрами имеет линейный положительный характер. С целью подтверждения линейной положительной связи между микротвёрдостью БФ и нагрузкой выполнен корреляционный анализ.

На основании полученных данных рассчитывался коэффициент корреляции между параметрами r_{xy} = 0,986. Уровень значимости модели α = 0,05 при степени свободы f_1 = 5 и f_2 = 2. Средний коэффициент эластичности $Э_{ср}$ = 1,8. Проведённое исследование позволило установить, что изменения в структуре ЗО и микротвёрдости возникают при увеличении нагрузки от 10 до 25 Н/мм^2.

Экспериментальную зависимость микротвёрдости БФ от нагрузки (рис. 13) можно аппроксимировать функцией

$$HV = -14{,}4 + 0{,}03F. \quad (1)$$

Следующим этапом данной части исследования было определение влияния пластического деформирования на изменение структуры и микротвёрдости при следующих параметрах: V = 0,2 м/с; F = 25 Н/мм^2; t = 50 – 400 с.

Изменение микроструктуры зоны оплавления при увеличении времени обработки приведено на рис. 10.

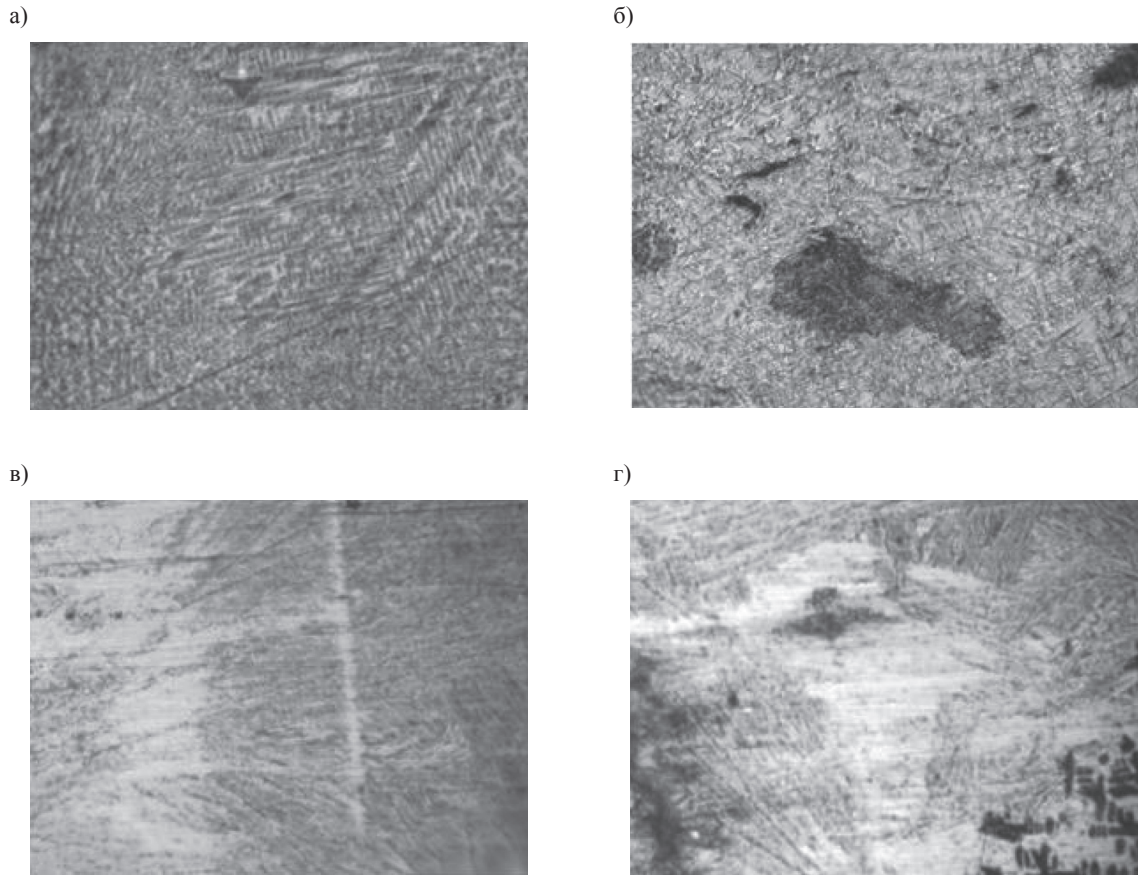


Рис. 10. Состояние микроструктуры БФ при различных значениях нагрузки:
при t = 50 с ×500; при t = 200 с ×500; при t = 300 с ×1000; при t = 400 с ×500, ×1,5

На данном этапе было определено, что наибольшее значение микротвёрдости «белой фазы» достигается при обработке в течение 300 с. На основании полученных данных построен график зависимости HV БФ от изменения времени обработки t, представленный на рис. 11.

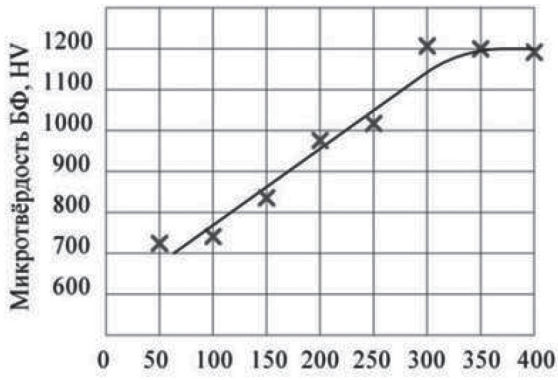


Рис. 11. График зависимости микротвёрдости БФ от времени обработки

Аналогично, как и при проведении опыта с изменением F, полученная зависимость позволяет определить, что значительные изменения микротвёрдости происходят при изменении времени обработки от 50 до 300 с. Дальнейшее увеличение времени обработки ведёт к образованию точки перегиба графика. При этом микротвёрдость принимает относительно постоянное значение при установлении времени обработки в пределах от 300 до 400 с. Из этого можно заключить, что изменение микротвёрдости происходит при варьировании времени обработки от 50 до 300 с. Так-

же из графика (см. рис. 11) можно установить, что при изменении времени обработки в диапазоне от 50 до 350 с построенные точки не находятся точно на линии, но собраны вдоль прямой линии, поэтому можно предположить, что связь между параметрами имеет линейный положительный характер. С целью подтверждения линейной положительной связи между микротвёрдостью БФ и временем обработки выполнен корреляционный анализ.

На основании данных рассчитывался коэффициент корреляции между параметрами r_{xy} = 0,978. Коэффициент детерминации R^2 = 0,956. Уровень значимости модели α = 0,05 при степенях свободы f_1 = 5 и f_2 = 2. Средний коэффициент эластичности $Э_{ср}$ = 2,5. Проведённое исследование позволило установить, что изменения в структуре ЗО и микротвёрдости возникают при изменении времени обработки от 50 до 350.

Экспериментальную зависимость микротвёрдости БФ от изменения времени обработки (см. рис. 11) можно аппроксимировать функцией

$$HV = –295,5 + 0,5t. \quad (2)$$

Заключительным этапом данной части исследования было определение влияния пластического деформирования на изменение структуры и микротвёрдости при следующих параметрах: F = 25 Н/мм^2; t = 300 с; V = 0,2 – 1,5 м/с. Изменение микроструктуры зоны оплавления при увеличении скорости обработки приведено на рис. 12.

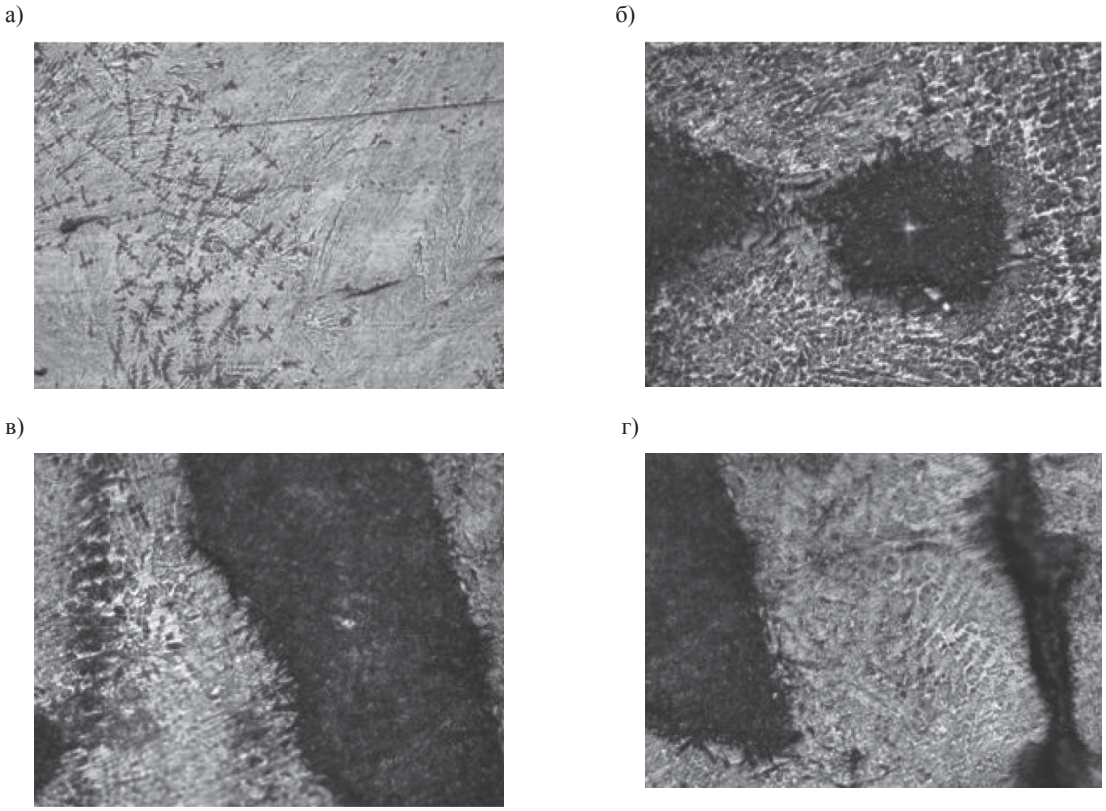


Рис. 12. Состояние микроструктуры БФ при различных значениях нагрузки:
а — при V = 0,1 м/с ×1000; *б* — при V = 0,7 м/с ×1000;
в — при V = 1,1 м/с ×1000; *г* — при V = 1,5 м/с ×1000

При изменении скорости обработки установлено изменение структуры ЗО. На основании полученных данных построен график зависимости HV БФ от изменения скорости обработки (V), представленный на рис. 13. Полученная зависимость позволяет определить, что значительные изменение микротвёрдости происходит при изменении скорости обработки от 0,1 до 0,7 м/с. Дальнейшее увеличение скорости обработки ведёт к снижению микротвёрдости БФ. Так как построен-

ные точки не находятся точно на линии, но собраны вдоль прямой линии, можно предположить, что связь между параметрами имеет линейный положительный характер. С целью подтверждения линейной положительной связи между микротвёрдостью БФ и скоростью обработки выполнен корреляционный анализ. На основании полученных данных рассчитывался коэффициент корреляции между параметрами $r_{xy} = 0{,}978$. Уровень значимости модели $\alpha = 0{,}05$ при степенях свободы $f_1 = 5$ и $f_2 = 2$. Средний коэффициент эластичности $Э_{ср} = 5{,}8$.

Экспериментальную зависимость микротвёрдости БФ от изменения скорости обработки (см. рис. 13) можно аппроксимировать функцией

$$HV = 4{,}77 - 3{,}74^{-3}\ V. \qquad (3)$$

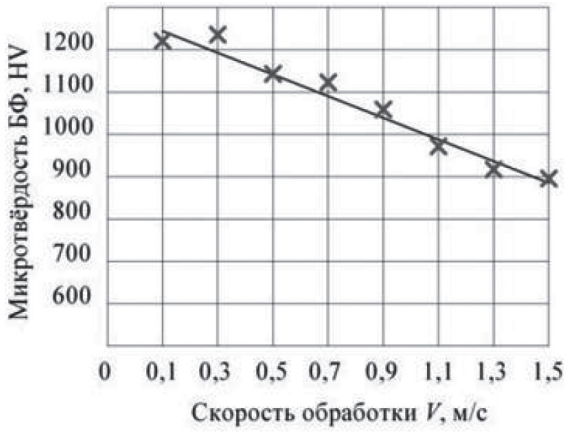


Рис. 13. График зависимости микротвёрдости БФ от скорости обработки

Проведённое исследование позволило установить, что изменения в структуре ЗО и микротвёрдости возникают при изменении скорости обработки от 0,1 до 1,5.

В ходе проведения эксперимента было определено, что после лазерного упрочнения с оплавлением поверхности возможно проведение дальнейшей обработки с целью повышения эффективности лазерного воздействия. Определено также, что упрочнение методом пластического деформирования способствует увеличению микротвёрдости структур, подверженных воздействию обработки. Изменение микротвёрдости сопровождается образованием в структурах, представляющих собой либо аустенит, либо ледебурит с ячейками аустенита, БФ. При этом на месте указанных структур образуется однородная белая структура, обладающая повышенной твёрдостью.

Важно отметить, что помимо аустенита и ледебурита с мелкоячеистыми включениями аустенита в структуре ЗО присутствуют включения перлита с распределёнными по периферии иглами мартенсита. Данные включения также претерпевали изменения как структуры, так и микротвёрдости в процессе обработки (рис. 14). В табл. 1 приведены данные по изменению микротвёрдости материала в ходе исследования.

а) б)

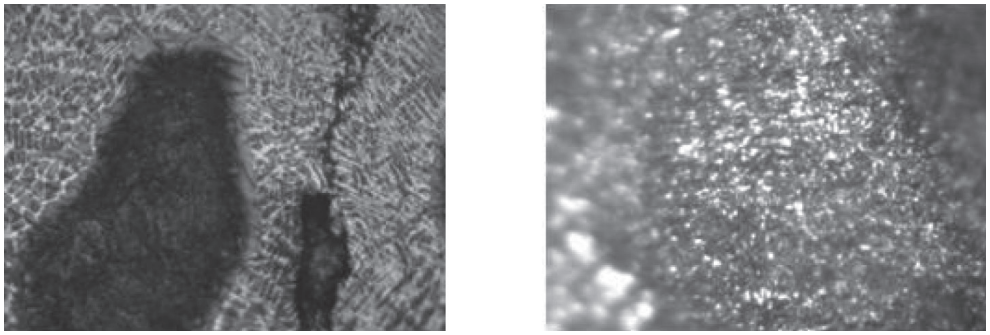


Рис. 14. Изменение структуры перлитных включений: *а* — ×500, ×1,5; *б* — ×1000

Таблица 1

Изменение микротвёрдости составляющих микроструктуры

Микротвёрдость средняя HV									
Исходный металл		После лазерной обработки		После трения					
				изменение F		изменение t		изменение V	
П	Л	П + М	Л + А	П + М	БФ	П + М	БФ	П + М	БФ
320	840	620	900	560	1086	610	980	640	1060

Примечание. В табл. 1 использованы следующие условные обозначения: П — перлит, Л — ледебурит, П + М — перлит и мартенсит, Л + А — ледебурит с ячейками аустенита, П + М — перлит с иглами мартенсита.

При проведении исследования с изменением нагрузки было установлено, что при $F > 35$ Н/мм^2 значимого изменения микротвёрдости не наблюдалось. Полученные в результате проведения эксперимента данные позволили вывести математическую модель зависимости ожидаемой микротвёрдости БФ от технологических режимов, использованных в ходе проведения эксперимента. В качестве независимых переменных были приняты следующие величины: нагрузка — F; время обработки — t; скорость обработки — V.

Факторы, их уровни и интервалы варьирования, выбранные на основании априорной информации и предварительных экспериментов, приведены в табл. 2, результаты эксперимента — в табл. 3.

Таблица 2

Факторы, уровни и интервалы варьирования

Фактор	Кодовое обозначение	Уровни факторов			Интервал варьирования
		+1	0	–1	
Нагрузка F, Н/мм^2	x_1	30	25	20	5
Время обработки t, с	x_2	350	300	250	50
Скорость обработки V, м/с	x_3	0,1	0,3	0,5	0,2

По данным параллельных опытов проводился расчёт дисперсий и проверялась гипотеза их однородности по критерию Кохрена. Поскольку выполнялось условие $G_{табл} = 0{,}6798 > G_{расч} = 0{,}341$, ряд дисперсий считался однородным.

Таблица 3

Результаты измерения микротвёрдости БФ

Номер опыта	Матрица планирования			Микротвёрдость белой фазы HV	
	x_1	x_2	x_3	y	
				1	2
1	+	+	+	753	722
2	–	+	+	850	903
3	+	–	+	980	1045
4	–	–	+	1178	1200
5	+	+	–	975	1025
6	–	+	–	894	921
7	+	–	–	1118	1120
8	–	–	–	1178	1204

Рассчитывались коэффициенты регрессии и проверялась их статистическая значимость. Статистически значимыми признавались коэффициенты, абсолютная величина которых равна или больше доверительного интервала. В данном случае это b_0, b_1, b_2, b_3, b_{12}, b_{13}, b_{23}. Величина коэффициента b_{123} менее доверительного интервала, поэтому он не имеет значимости. Таким образом, в результате полного факторного эксперимента 2^3 для исследуемого чугуна были получены уравнения регрессии для микротвёрдости БФ в кодированном виде:

$$y = 1004 - 36{,}875\,x_1 - 123{,}75x_2 - 50{,}25\,x_3 + 25{,}25x_1x_2 - 42{,}0x_1x_3 - 23{,}125x_2x_3. \qquad (4)$$

Адекватность модели проверялась по критерию Фишера. При уровне значимости α=0,05 табличное значение критерия Фишера $F_{табл} = 3{,}84$. Поскольку $F_{табл} = 3{,}84 > F_{рас} = 1{,}302$, принималась гипотеза об адекватности моделей.

Поверхности отклика в кодированной форме для рассматриваемой модели приведены на рис. 15.

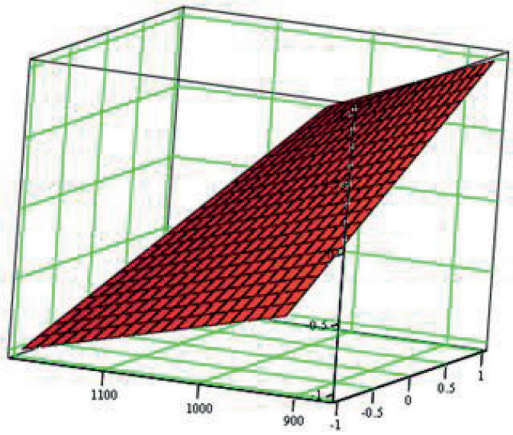


Рис. 15. Поверхности отклика в кодированной форме

Линии одного уровня в натуральных значениях для рассматриваемой модели приведены на рис. 16.

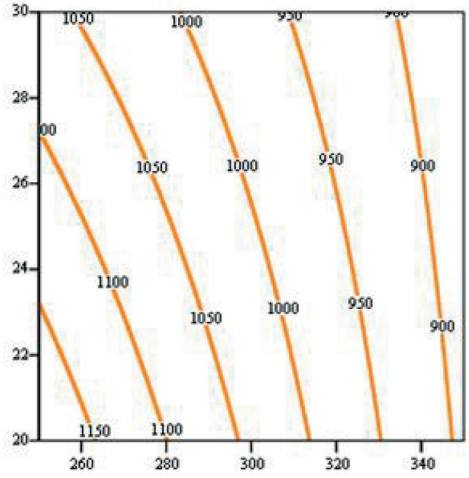


Рис. 16. Линии одного уровня в натуральных значениях

В результате перехода от кодированных значений к натуральным с использованием формул перехода:

$$x_1 = \frac{F - 25}{5};\ x_2 = \frac{t - 300}{50};\ x_3 = \frac{V - 0{,}3}{0{,}2},$$

можно определить микротвёрдость БФ следующим образом:

$$HV = 2240{,}625 - 25{,}075F - 4{,}306t + 1492{,}5V + 0{,}101Ft - 42FV - 2{,}313tV. \quad (5)$$

Полученное выражение позволяет с достаточно высокой точностью определить ожидаемую микротвёрдость БФ в ЗЛВ при различных параметрах нагрузки, времени обработки и скорости обработки в исследуемом интервале значений скорости обработки.

Необходимо отметить, что поскольку процесс образования БФ является малоизученным, до сих пор причиной структурных изменений поверхностных слоёв считались высокотемпературные фазовые превращения, протекающие в результате интенсивного скольжения и трения между телами. При нагреве выше 700 ºС в месте контакта возможно формирование аустенита и растворение карбидов. При отсутствии контакта между телами в результате быстрого охлаждения в поверхностном слое имеет место мартенситное превращение [10] – [12]. В работах [9], [13], [14] приводится доказательство того, что основной причиной сильного изменения поверхностных слоёв материала является формирование твёрдых наноструктурных слоёв, обладающих высокой износостойкостью при температурах, значительно ниже температур фазовых превращений.

Заключение (Conclusion)

Ввиду большого количества остаточного аустенита (30 – 50 %) в зоне лазерного воздействия, упрочнённый слой может быть подвергнут дальнейшим упрочняющим операциям с целью повышения твёрдости зоны лазерного воздействия. Методом, позволяющим произвести дальнейшее упрочнение зоны лазерного воздействия, является метод пластического деформирования с изменением микроструктуры зоны воздействия. В процессе пластического деформирования ЗЛВ в зоне контакта происходит преобразование исходной структуры в БФ, характеризующуюся повышенными значениями микротвёрдости. Наибольшее значение микротвёрдости БФ, полученной в ходе эксперимента, превышает 1200 HV. Математический анализ в виде полного факторного эксперимента 2^3 позволяет получить выражение (2), связывающее микротвёрдость БФ с технологическими режимами пластического деформирования.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Блинов И. С.* Справочник технолога механосборочного цеха судоремонтного завода / И. С. Блинов. — М.: Морской транспорт, 1960. — 589 с.

2. *Отений Я. Н.* Особенности формирования глубины упрочнения при обработке деталей поверхностным пластическим деформированием / Я. Н. Отений, С. Н. Олъштынский // Известия Волгоградского государственного технического университета. — 2007. — Т. 1. — № 3 (29). — С. 79–82.

3. *Матвеев Ю. И.* Формирование структур серого чугуна в зоне лазерного воздействия / Ю. И. Матвеев, С. С. Казаков // Вестник НГИЭИ. — 2011. — Т. 2. — № 1 (2). — С. 41–53.

4. *Ходаковский В. М.* Исследование влияния режима лазерной обработки на глубину и структуру упрочнённой зоны чугунных деталей судовых ДВС / В. М. Ходаковский, Е. П. Патенкова, И. И. Кулешов // Вестник Морского государственного университета. — 2016. — № 74. — С. 28–36.

5. *Кулешов И. И.* Повышение работоспособности поршневых канавок головок поршней судовых малооборотных двигателей / И. И. Кулешов, В. М. Ходаковский // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2016. — № 6 (40). — С. 155–168. DOI: 10.21821/2309-5180-2016-8-6-155-168.

6. *Zhigalkin V. M.* Deformation of semi-brittle materials. strengthening in case of complex loading / V. M. Zhigalkin, O. M. Usol'tseva // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. — 2002. — № 6. — С. 39–46.

7. *Ковальчук Б. И.* О деформировании полухрупких тел / Б. И. Ковальчук // Проблемы прочности. — 1982. — № 9. — С. 51–57.

8. *Лалазарова Н. А.* Упрочнение твердосплавных резцов для обработки деталей из высокопрочного чугуна методами поверхностного пластического деформирования / Н. А. Лалазарова, Л. И. Путятина,

А. В. Щукин // Вестник Харьковского национального автомобильно-дорожного университета. — № 33. — 2006. — С. 109–111.

9. *Васильев М. А.* Нанокристаллизация металлических поверхностей методами интенсивной пластической деформации / М. А. Васильев, Г. И. Прокопенко, В. С. Филатова // Успехи физ. мет. — 2004. — Т. 5. — С. 345–399.

10. *Мойар Г. Дж.* Анализ термических нагрузок на наклёп железнодорожного колеса / Г. Дж. Мойар, Д. Х. Стоун // Износ. — 1991. — Т. 144. — № 1. — С. 117–138.

11. *Грабски М. В.* Границы зерен как места скопления дислокаций / М. В. Грабски, Р. Корски // Философский журнал. — 1970. — Т. 22. — № 178. — С. 707–715.

12. *Эйр Т. С.* Образование белых слоев на поверхностях трения / Т. С. Эйр, А. Бакстер // Трибология. — 1972. — Т. 5. — № 6. — С. 256–261.

13. *Бауман Г.* Сравнение формирования нанофазы при изнашивании поверхности при трении и механическом истирании перлитной стали / Г. Бауман, Ю. Жонг, Г. Дж. Фехт // Наноструктурированные материалы. — 1996. — Т. 7. — № 1-2. — С. 237–244.

14. *Бауман Г.* Формирование слоев белого травления на рельсовых дорожках / Г. Бауман, Г. Дж. Фехт, С. Лебельт // Износ. — 1996. — Т. 191. — № 1-2. — С. 133–140.

REFERENCES

1. Blinov, I. S. *Spravochnik tekhnologa mekhano-sborochnogo tsekha sudoremontnogo zavoda*. M.: Mor. transport, 1960.

2. Oteniy, Ya. P., and S. P. Ol'shtyinskiy. "Osobennosti formirovaniya glubinyi uprochneniya pri obrabotke detaley poverhnostnyim plasticheskim deformirovaniem." *Izvestiya Volgogradskogo gosudarstvennogo tehnicheskogo universiteta* 1.3(29) (2007): 79–82.

3. Matveev, Y. I., and S. S. Kazakov. "Formation of structures of grey pig-iron in the zone of laser influence." *Bulletin NGII* 2.1(2) (2011): 41–53.

4. Hodakovskij, V. M., E. P. Patenkova, and I. I. Kuleshov. "Issledovanie vlijanija rezhima lazernoj obrabotki na glubinu i strukturu uprochnjonnoj zony chugunnyh detalej sudovyh DVS." *Vestnik Morskogo gosudarstvennogo universiteta* 74 (2016): 28–36.

5. Kuleshov, Igor Igorevich, and Vladimir Mikhailovich Khodakovsky. "Improving the operability of the piston's crowns rings grooves of low speed propulsion marine diesel engine." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova* 6(40) (2016): 155–168. DOI: 10.21821/2309-5180-2016-8-6-155-168.

6. Zhigalkin, V. M., and O. M. Usol'tseva. "Experimental investigation into deformation of semi-brittle materials. Communication II: Strengthening and loosening under complex loading." *Journal of Mining Science* 38.6 (2002): 558–564.

7. Kovalchuk, B. I. "O deformirovanii poluhrupkih tel." *Problemyi prochnosti* 9 (1982): 51–57.

8. Lalazarova, N., L. Putyatina, and A. Shchukin. "Hardening by syrface plastic deformation of hard-carbide tools for machining of high-strength cast-iron." *Bulletin of Kharkov National Automobile and Highway University* 33 (2006): 109–111.

9. Vasil'ev, M. A., G. I. Prokopenko, and V. S. Filatova. "Nanokristallizatsiya metallicheskikh poverkhnostei metodami intensivnoi plasticheskoi deformatsii." *Uspekhi fiz. met.* 5 (2004): 345–399.

10. Moiar, G. Dzh., and D. Kh. Stoun. "Analiz termicheskikh nagruzok na naklep zheleznodorozhnogo kolesa." *Iznos* 144.1 (1991): 117–138.

11. Grabski, M. V., and R. Korski. "Granitsy zeren kak mesta skopleniya dislokatsii." *Filosofskii zhurnal* 22.178 (1970): 707–715.

12. Eir, T. S., and A. Bakster. "Obrazovanie belykh sloev na poverkhnostyakh treniya." *Tribologiya* 5.6 (1972): 256–261.

13. Bauman, G., Yu. Zhong, and G. Dzh. Fekht. "Sravnenie formirovaniya nanofazy pri iznashivanii poverkhnosti pri trenii i mekhanicheskom istiranii perlitnoi stali." *Nanostrukturirovannye materialy* 7.1-2 (1996): 237–244.

14. Bauman, G., G. Dzh. Fekht, and S. Lebel't. "Formirovanie sloev belogo travleniya na rel'sovykh dorozhkakh." *Iznos* 191.1-2 (1996): 133–140.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Кулешов Игорь Игоревич — аспирант
Научный руководитель:
Ходаковский Владимир Михайлович
Морской государственный университет
имени адмирала Г. И. Невельского
690003, Российская Федерация, г. Владивосток,
ул. Верхнепортовая, д. 50а
e-mail: *igor-igorevich.2011@bk.ru*
Ходаковский Владимир Михайлович —
кандидат технических наук, доцент
Морской государственный университет
имени адмирала Г. И. Невельского
690003, Российская Федерация, г. Владивосток, ул.
Верхнепортовая, д. 50а
e-mail: *khodprim@mail.ru*

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Kuleshov, Igor I. — Postgraduate
Supervisor:
Khodakovskiy, Vladimir M.
Maritime State University
named after admiral G.I. Nevelskoi
50a Verkhneportovaya Str., Vladivostok, 690003,
Russian Federation
e-mail: *igor-igorevich.2011@bk.ru*
Khodakovskiy, Vladimir M. —
PhD, associate professor
Maritime State University
named after admiral G.I. Nevelskoi
50a Verkhneportovaya Str., Vladivostok, 690003,
Russian Federation
e-mail: *khodprim@mail.ru*

Статья поступила в редакцию 3 мая 2017 г.
Received: May 3, 2017.

ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ КОМПЛЕКСЫ И СИСТЕМЫ

DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-4-829-837

RATIONALE FOR REALIZATION OF PHASE-SHIFTING DEVICE WITH CODE ADJUSTMENT DEPENDING ON FREQUENCY OF VOLTAGE

V. G. Sugakov, N. S. Varlamov, Yu. S. Malyshev

Volga state university of water transport, Nizhny Novgorod, Russian Federation

Analysis of control systems of semiconductor converter shows that the deviation of the network frequency negatively affects some consumers of electrical energy on ship, in particular, the phase-shifting devices that it is part of the control system of valve converter. As a result, an error appears in the formation of a given control angle, which leads to a change in the output parameters of the converter and a deterioration in its adjustment characteristics. The object of the research is a three-phase rectifier; it performed based on a semi-controlled bridge circuit. The purpose of the study is to reduce the sensitivity to changing the frequency of the input voltage and improve the control characteristics of the controlled rectifier. For this objective, simulation models of the channels of the control system of a controlled rectifier with various types of phase-shifting devices have been developed and investigated. The output mean value of rectified voltage of the converter was measured with variation of voltage frequency and variation of control angle. The processing of data obtained because of modeling a rectifier used as a source of power for the active load is presented. Comparison of simulation results showed that the presence of a memory block consisting of a digital phase-shifting system could reduce error of the mean of the rectified voltage output from the controlled rectifier. The results of research show practical possibility of realization control system based on the proposed digital phase-shifting device with resistance to frequency variations in the supply network. The realized system control is advisable to apply in the structure of a controlled rectifier in order to reduce the error of the output mid-rectified voltage when supplying from voltage sources on ship.

Keywords: phase-shifting device, instability voltage frequency, control system, semiconductor converters, imitation model.

For citation:
Sugakov, Valerij G., Nikita S. Varlamov, and Yury S. Malyshev. "Rationale for realization of phase- shifting device with code adjustment depending on frequency of voltage." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 9.4 (2017): 829–837. DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-4-829-837.

УДК 621.316.722.3

ОБОСНОВАНИЕ РЕАЛИЗАЦИИ ФАЗОСМЕЩАЮЩЕГО УСТРОЙСТВА С КОРРЕКЦИЕЙ КОДА В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ЧАСТОТЫ НАПРЯЖЕНИЯ

В. Г. Сугаков, Н. С. Варламов, Ю. С. Малышев

ФГБОУ ВО «Волжский государственный университет водного транспорта»,
г. Нижний Новгород, Российская Федерация

Анализ систем управления полупроводниковых преобразователей показывает, что отклонение частоты сети оказывает негативное влияние на ряд судовых потребителей электрической энергии, в частности, на фазосмещающие устройства, входящие в состав системы управления вентильным преобразователем. В результате этого появляется погрешность формирования заданного угла управления, что приводит к изменению выходных параметров преобразователя и ухудшению его регулировочных характеристик. Объектом исследования является трехфазный выпрямитель, выполненный на основе полууправляемой мостовой схемы. Задачей исследования являются снижение чувствительности к изменению частоты входного напряжения и улучшение регулировочных характеристик управляемого выпрямителя. С этой целью разработаны

и исследованы имитационные модели каналов системы управления управляемого выпрямителя с различными типами фазосмещающих устройств. Измерения выходного среднего значения выпрямленного напряжения преобразователя проводились при изменениях частоты напряжения и угла управления. Представлена обработка данных, полученных в результате моделирования выпрямителя, используемого в качестве источника питания активной нагрузки. Сопоставление результатов моделирования показало, что наличие блока памяти в составе цифрового фазосмещающего устройства позволяет уменьшить погрешность среднего значения выпрямленного напряжения с выхода управляемого выпрямителя. Результаты исследования показывают практическую возможность реализации системы управления на базе предложенного цифрового фазосмещающего устройства с устойчивостью к отклонениям частоты питающей сети. Реализованную систему управления целесообразно применять в составе управляемого выпрямителя с целью уменьшения погрешности выходного средневыпрямленного напряжения при питании от судовых источников напряжения.

Ключевые слова: фазосмещающее устройство, нестабильность частоты, системы управления, полупроводниковый преобразователь, имитационная модель.

Для цитирования:
Сугаков В. Г. Обоснование реализации фазосмещающего устройства с коррекцией кода в зависимости от частоты напряжения / В. Г. Сугаков, Н. С. Варламов, Ю. С. Малышев // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2017. — Т. 9. — № 4. — С. 829–837. DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-4-829-837.

Введение

Фазосмещающее устройство (ФСУ) является важным компонентом системы управления полупроводниковым преобразователем. Функция ФСУ сводится к преобразованию управляющего сигнала u_y в угол управления α, отсчитываемый от момента естественной коммутации вентиля полупроводникового преобразователя [1].

В реальных режимах судовой электростанции вследствие изменения генерируемой и потребляемой мощности происходит изменение частоты питающей сети, что влечет за собой ряд негативных последствий [2], [3], а именно: снижение КПД механизмов, рост потребления активной и реактивной мощностей, снижение перегрузочной способности асинхронного двигателя и др. Изменение частоты питающей сети оказывает большое влияние на режимы работы систем управления полупроводниковых преобразователей электрической энергии, вследствие чего наблюдается увеличение погрешности задания угла управления α.

Правилами Российского речного регистра к отклонениям напряжения и частоты от номинальных значений устанавливается следующая норма*: изменение частоты питающего напряжения не должно превышать 10 % при кратковременном отклонении и 5 % — при длительном* [4]. Согласно [5], отклонение частоты в изолированных системах электроснабжения с автономными генераторными установками не должно превышать ±1 Гц в течение 95 % времени интервала в одну неделю и ±5 Гц в течение 100 % времени интервала в одну неделю.

Использование обратной связи или схем умножения частоты для корректировки частоты импульсов с выхода генератора опорного напряжения нашло свое применение в ФСУ при питании от источников ограниченной мощности [6]. Недостатком данных ФСУ является невозможность равномерного изменения угла управления при изменении частоты напряжения. В связи с этим предложено цифровое фазосмещающее устройство (ЦФСУ) [7], [8], которое за счет коррекции кода в зависимости от частоты напряжения обеспечивает практически плавное изменение заданного угла управления и высокую его стабильность в условиях нестабильности частоты питающей сети.

Материалы и методы

Модель полупроводникового преобразователя с системой управления на базе ФСУ устройств различных типов. Наиболее широкое применение в установках различных типов находят трехфазные схемы, при этом в большинстве судовых преобразовательных устройств применяется трехфазная мостовая схема вентильных комплектов, обладающая относительно малой

величиной пульсаций, высокой степенью использования трансформатора и сравнительно небольшими массогабаритными показателями сглаживающего фильтра [9] – [11].

Для исследования свойств полупроводникового преобразователя и оценки его относительной погрешности выходного напряжения с предложенными моделями каналов управления в условиях нестабильности частоты питающей сети разработана модель управляемого выпрямителя в программном пакете MATLAB (номер лицензии 530479). Общий вид модели представлен на рис. 1 (рис. 1, 4 – 7 с высоким разрешением доступны по ссылке https://journal.gumrf.ru/files/upload/art/9-4-5SVM.rar).

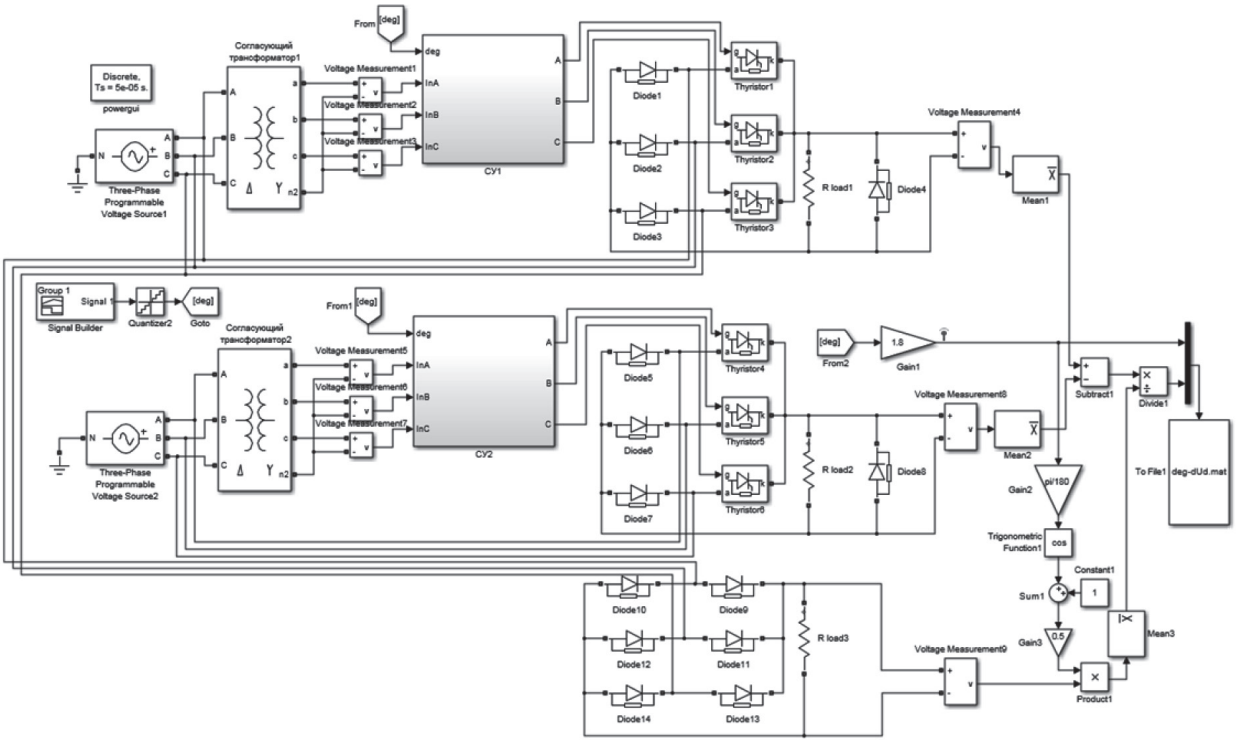


Рис. 1. Имитационная модель полупроводникового преобразователя

Изменение частоты напряжения у исследуемой модели задается непосредственно программируемым трехфазным источником напряжения *Three-Phase Programmable Voltage Source1* с выходным напряжением 400 В. К выходу источника напряжения подключен полупроводниковый преобразователь с активной нагрузкой *R load1*. Полупроводниковый преобразователь (ПП) представлен в виде трехфазного мостового полууправляемого выпрямителя [9] — рис. 2, образованного тиристорами *Thyristor 1 ... 3* и диодами *Diode 1 ... 3*. Управляющие импульсы на вентили ПП формирует подсистема *СУ1*, синхронизация с сетью которой осуществляется через согласующий трансформатор и элементы *Voltage Measurement 1 ... 3*. Согласующий трансформатор представлен в виде блока *Three-Phase Transformer1* с подключением обмоток по схеме Δ/Y-11 с напряжением первичной обмотки 400 В и вторичной — 5 В. Среднее значение выпрямленного напряжения с выхода *Mean1* U_{dCY1} для сравнения с эталонным поступает на положительный вход блока *Subtract1*.

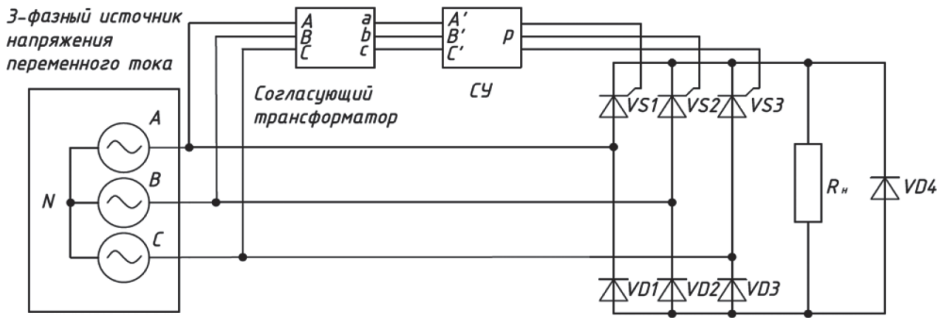


Рис. 2. Структурная схема полууправляемого выпрямителя

В качестве эталонной модели используется схема, образованная блоками *Three-Phase Programmable Voltage Source2* с постоянной частотой напряжения, *Three-Phase Transformer 2*, *Voltage Measurement 5 … 7*, *Thyristor 4 … 6, Diode 5 … 7*, *R load 2* и подсистемой *СУ2*. Среднее выпрямленное напряжение в эталонной модели с выхода *Mean2* $U_{dCУ2}$ поступает на отрицательный вход блока *Subtract1*.

Подсистемы *СУ1* и *СУ2* состоят из трех идентичных каналов, каждый из которых формирует управляющие импульсы в соответствии с фазой питающего напряжения. Задание углов управления осуществляется блоками *Signal Builder* и *Quantizer*.

При построении зависимостей в качестве базисной величины принято среднее значение выпрямленного напряжения $U_{d\alpha}$ с выхода модели выпрямителя, образованной элементами *Diode 9 … 13*, *R Load3*, *Voltage Measurement 9*, *Product 1*, *Gain 2 … 3*, *Sum1*, *Constant1*, *Trigonometric Function 1* и функционирующей при изменяющейся частоте напряжения с выхода источника напряжения *Three-Phase Programmable Voltage Source1*. В качестве постоянной частоты напряжения источника эталонной модели принята промышленная частота, равная 50 Гц. В исследуемой модели изменение частоты напряжения находится в диапазоне 45 – 55 Гц, что соответствует требованиям правил Российского речного регистра судоходства. Моделирование выполнялось при неизменной активной нагрузке для всех измерений. Величина потребляемой мощности составляет 4 кВт.

Имитационные модели каналов систем управления полупроводниковым преобразователем электрической энергии. Общая структурная схема системы управления (*СУ*) полупроводниковым преобразователем (*ПП*) — рис. 3, *а* — содержит *ФСУ*, на вход которой подается сигнал управления *g*. Сигнал α с выхода *ФСУ* поступает на вход выходного формирователя (*ВФ*), на выходе которого появляются управляющие импульсы *y*, поступающие на вентили силового блока (*СБ*). Также *СУ* может иметь контур отрицательной обратной связи (*ОС*), на вход которого поступает какой-либо выходной параметр $u'(t)$ с преобразователя или объекта, получающего питание от преобразователя. На выходе блока *ОС* формируется напряжение $u_{ОС}$, которое поступает на вход *СУ* в виде сигнала отрицательной обратной связи. В качестве сигнала для организации обратной связи могут использоваться такие параметры, как напряжение, сила тока, частота или частота вращения исполнительного механизма и т. д.

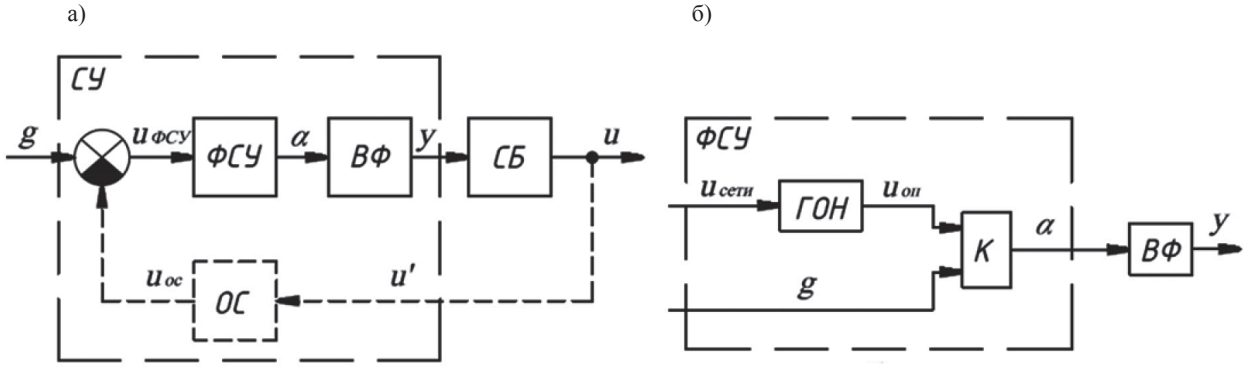


Рис. 3. Структурная схема системы управления полупроводниковым преобразователем (*а*) и ФСУ (*б*)

Основным элементом СУ любого преобразователя служит ФСУ (см. рис. 1, *б*), где на один вход компаратора поступает управляющее напряжение *g*, а на второй вход подается опорное напряжение $u_{оп}$ с выхода генератора опорного напряжения (ГОН). Компаратор (*К*) сравнивает входные напряжения *g* и $u_{оп}$. В момент равенства этих напряжений компаратор переключается, и на его выходе появляется сигнал α, поступающий на выходной формирователь.

Имитационная модель одного канала СУ на базе дискретного фазосмещающего устройства (ДФСУ), работающего по «вертикальному» принципу, приведена на рис. 4 [1]. Элемент Relay1 является входом модели устройства, на который подается синхронизированное синусоидальное напряжение. Элементы Integrator1, Gain1 и Subtract1 обеспечивают имитацию вычитающего счетчика. При этом на первый вход вычитающего счетчика подаются импульсы стабильной частоты с генератора импульсов стабильной частоты, представленного элементом Pulse Generator. Сигнал сброса, сформированный элементами Relay1 и Hit Crossing1 в моменты естественной коммутации, поступает на вход сброса вычитающего счетчика. Элемент Relation Operator1 является компаратором, который формирует сигнал прямоугольной формы при соблюдении неравенства двух сигналов: спадающего сигнала с выхода вычитающего счетчика и сигнала, пропорционального углу управления α (выход элемента Subtract2).

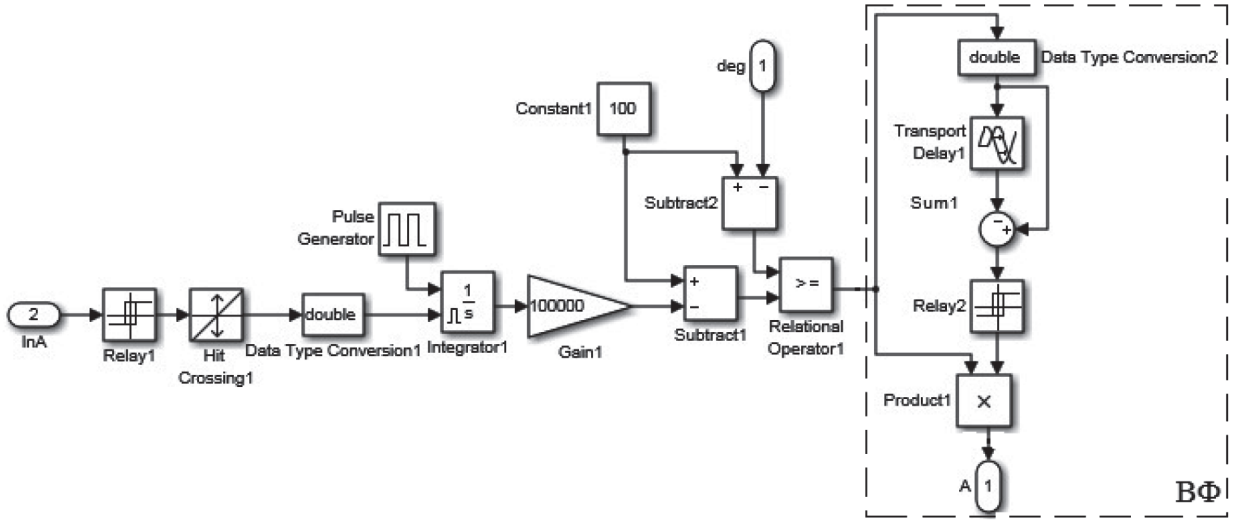


Рис. 4. Блок-схема имитационной модели одного канала с ДФСУ

Имитационная модель канала с ЦФСУ [7] представлена на рис. 5. Синхронизированное напряжение синусоидальной формы поступает на формирователь прямоугольных импульсов элементом *Relay1*. Прямоугольный импульс с выхода *Relay1* поступает на первый логический элемент И *Logical Operator2* и через логический элемент НЕ *Logical Operator1* на второй логический элемент И *Logical Operator3*, к первым входам которых поступают импульсы стабильной частоты с *Pulse Generator*. Суммирующий счетчик (элементы *Integrator2* и *Gain2*) формирует нарастающий сигнал, конечное значение которого пропорционально половине периода отрицательной полуволны напряжения. Этот сигнал поступает далее на второй вход блока памяти и на вход вычитающего счетчика. Блок памяти *2-D Lookup Table1* формирует сигнал в зависимости от угла управления α (выход элемента *deg*) и отрицательной половины периода напряжения. По адресам блока памяти записаны значения задающего сигнала, соответствующие частоте питающего напряжения и заданному углу управления.

Из элементов *Integrator1*, *Gain2*, *Sum3*, *Abs1*, *Sum4* и *Gain3* собран вычитающий счетчик, который формирует спадающий сигнал при положительной полуволне напряжения. При соблюдении неравенства сигналов с выходов вычитающего счетчика и блока памяти элемент *Relation Operator1* формирует сигнал прямоугольной формы, фаза которого соответствует необходимому углу управления. Далее этот сигнал поступает на ВФ.

Элементы *Transport Delay2*, *Sum2*, *Relay3* и *Transport Delay1*, *Sum1*, *Relay2* образуют первый и второй формирователи импульсов. По фронту прямоугольного сигнала с выхода элементов *Sum1* и *Relay1* формирователи генерируют короткие импульсы, которые сбрасывают значения сигналов суммирующего и вычитающего счетчиков.

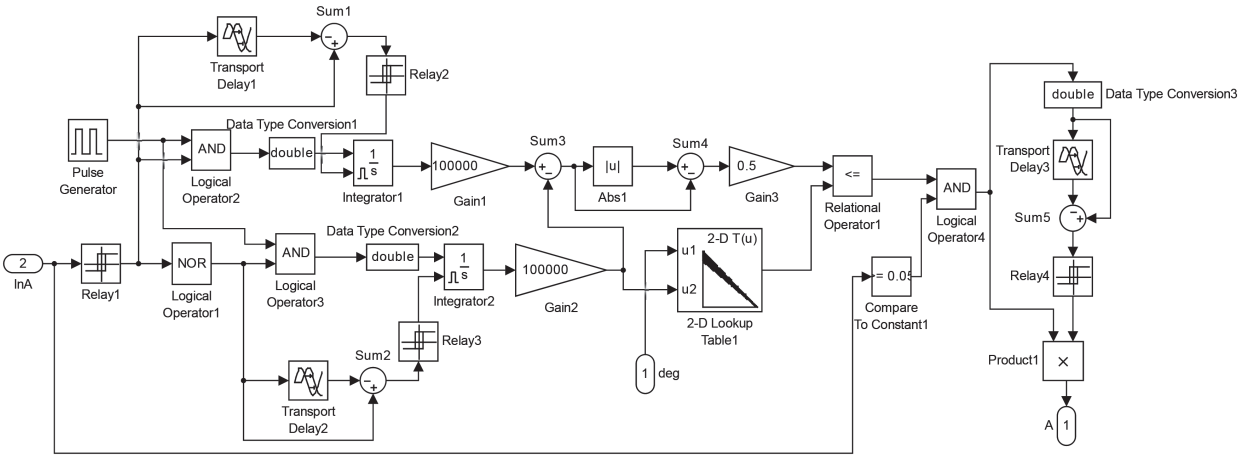


Рис. 5. Блок-схема имитационной модели одного канала с ЦФСУ

При изменении частоты питающего напряжения (например, при её уменьшении) на выходе элемента *Integrator2* будет сформировано большее значение сигнала, который поступит на первый вход блока памяти *2-D Lookup Table1*. При этом на выходе *2-D Lookup Table1* появится большее значение сигнала, и равенство значений сигналов с выходов *2-D Lookup Table1* и *Integrator1* наступит позже. Фаза сигнала угла управления α будет соответствовать мгновенному значению U_α питающего напряжения так же, как при номинальной частоте. *Compare To Constant1* и *Logical Operator4* выполняют функцию ограничения максимального и минимального угла управления. Кроме того, в моделях каналов с ЦФСУ и ДФСУ присутствуют выходные формирователи, состоящие из блоков *Data Type Conversion3*, *Transport Delay3*, *Sum5*, *Relay4* и *Product1* (ЦФСУ) и *Data Type Conversion2*, *Transport Delay1*, *Sum1*, *Relay2* и *Product1* (ДФСУ). ВФ работают аналогично формирователям коротких импульсов, описанных в модели ЦФСУ. Элементы модели *Gain 1...3* и *Data Type Conversion 1 ... 3* предназначены для преобразования значений и типов сигналов внутри подсистемы.

Результаты исследования

Проведено исследование имитационной модели ПП на характер влияния изменения частоты питающего напряжения для различных моделей каналов СУ. По результатам имитационного моделирования ПП с различными видами каналов СУ были построены характеристики зависимостей относительной погрешности среднего выпрямленного напряжения от величины угла управления α, представленные на рис. 6. При этом относительная погрешность среднего выпрямленного напряжения δU_d определялась выражением

$$\delta U_d = \frac{U_{d\text{СУ1}} - U_{d\text{СУ2}}}{U_{d\alpha}}.$$

Из характеристик (рис. 6, *а*) следует, что при работе ПП с ДФСУ в диапазоне угла управления α = 90 ... 130° наблюдается увеличение погрешности δU_d на исследуемых частотах. При этом диапазон значений относительной погрешности δU_d составляет от –0,42 до 0,5 при изменении частоты напряжения от 45 Гц до 55 Гц. Также по мере изменения угла управления к минимальному углу или частоты напряжения в сторону номинальной величина погрешности δU_d уменьшается.

При проведении аналогичного моделирования ПП с ЦФСУ (рис. 6, *б*) при тех же условиях диапазон величин δU_d изменяется в интервале от –0,074 до 0,052. Также наблюдаются пересечения характеристик через ноль. Максимумы характеристик зафиксированы на разных интервалах регулирования угла управления. Кроме того, наблюдается снижение разброса максимального угла управления (рис. 6, *в*).

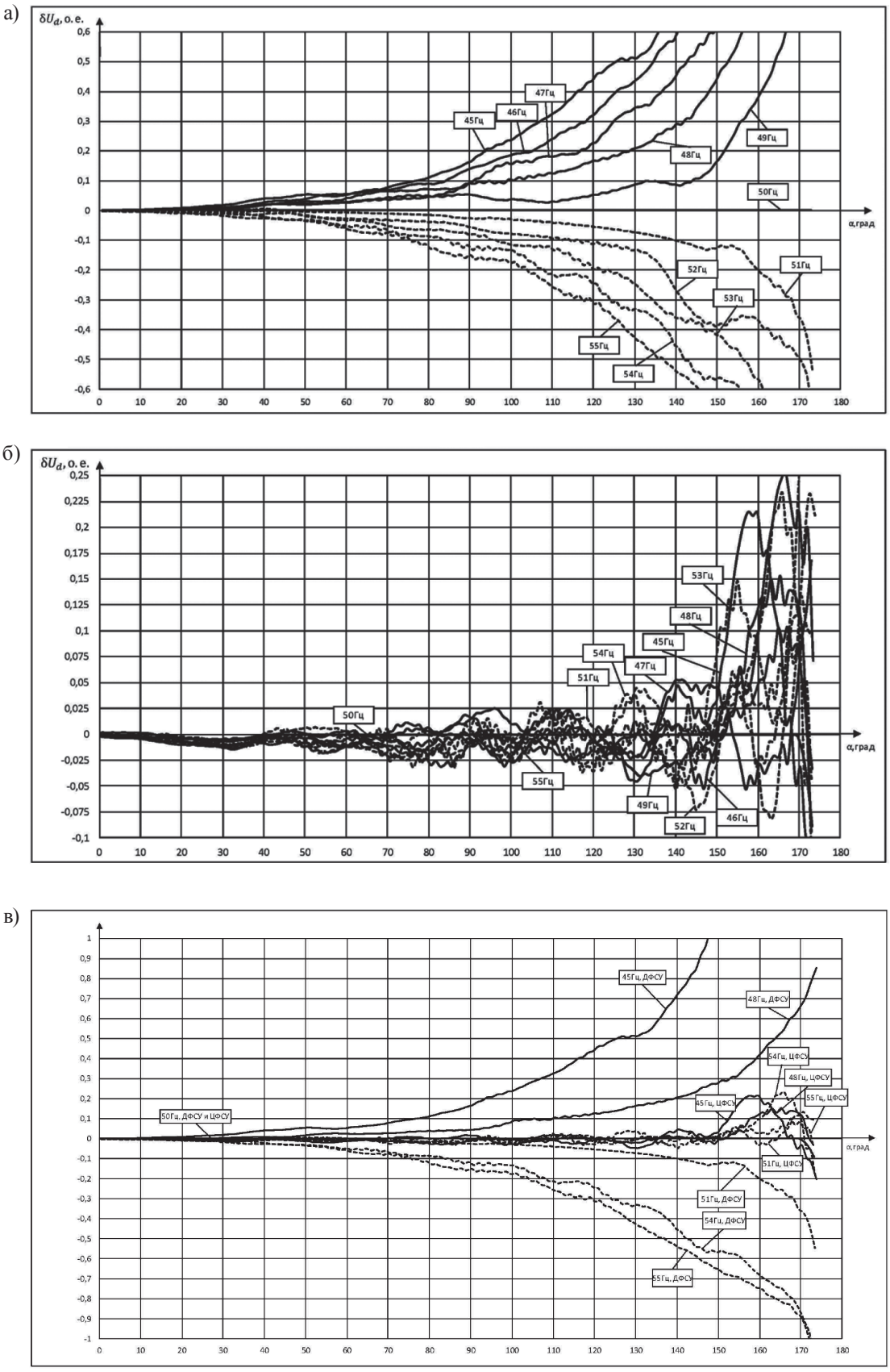


Рис. 6. Зависимости относительной погрешности выпрямленного напряжения от угла управления при работе ПП с ДФСУ (*а*), ЦФСУ (*б*) и с ДФСУ и ЦФСУ (*в*)

Таким образом, выполненный анализ моделей доказывает, что управляемый выпрямитель совместно с ЦФСУ по сравнению с ДФСУ имеет меньшую погрешность задания углов управления при изменении частоты напряжения, что способствует стабилизации выходных параметров с выхода ПП и, следовательно, повышению его эффективности в условиях нестабильности частоты питающего напряжения.

Заключение

Предложенное ЦФСУ обеспечивает высокую стабильность заданного угла управления и практически плавное его изменение в условиях нестабильности частоты питающего напряжения. Результаты моделирования управляемого выпрямителя с ЦФСУ свидетельствуют о возможности и целесообразности его практической реализации.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Горбачев Г. Н.* Промышленная электроника / Г. Н. Горбачев, Е. Е. Чаплыгин; под ред. В. А. Лабунцова. — М.: Энергоатомиздат, 1988. — 320 с.

2. *Иванов А. В.* Анализ влияния параметров напряжения на работу асинхронных машин / А. В. Иванов, Э. А. Бекиров, М. М. Асанов // Строительство и техногенная безопасность. — 2016. — № 3 (55). — С. 67–71.

3. Fuchs E. Power Quality in Power Systems and Electrical Machines / E. Fuchs, M. A. S. Masoum. — Second edition. — Academic Press, 2015. — 1140 p. DOI: 10.1016/B978-0-12-800782-2.09989-9.

4. Правила Российского Речного Регистра: в 5 т. — М.: Российский речной регистр, 2017. — Т. 2. Правила классификации и постройки судов (ПКПС). — 1885 с.

5. ГОСТ 32144-2013. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. — М.: Стандартинформ, 2014. — 6 с.

6. Пат. 2373624 Российская Федерация, МПК H02M 1/08 Фазосдвигающее устройство / Л. И. Цытович, М. М. Дудкин, А. В. Качалов, Р. М. Рахматулин; заяв. и патентообл. Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Южно-Уральский государственный университет». — № 2008142656/09; Заявл. 27.10.2008; Опубл. 20.11.2009; Бюл. № 32. — 15 с.

7. Пат. 2612055 Российская Федерация, МПК G01R 25/00. Цифровое фазосмещающее устройство / В. Г. Сугаков, О. С. Хватов, Н. С. Варламов; заяв. и патентообл. Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Волжский государственный университет водного транспорта». — № 2015155112; Заявл. 22.12.2015; Опубл. 02.03.2017; Бюл. № 7. — 6 с.

8. *Сугаков В. Г.* Применение фазосмещающего устройства в условиях нестабильности частоты питающего напряжения / В. Г. Сугаков, Н. С. Варламов, А. И. Мешков // Актуальные проблемы электроэнергетики: сб. науч.-техн. статей. — Н.Новгород: Нижегородский гос. техн. ун-т им. Р. Е. Алексеева, 2016. — С. 168–172.

9. Power electronics handbook: devices, circuits, and applications handbook / edited by Muhammad H. Rashid. — 3rd ed. — Elsevier Inc., 2011. — 1390 p. DOI: 10.1016/B978-0-12-382036-5.00051-3.

10. *Климаш В. С.* Обобщенное математическое описание и моделирование тиристорных преобразователей, ведомых сетью / В. С. Климаш, Йе Мин Тху // Электротехнические системы и комплексы. — 2016. — № 4 (33). — С. 78–86. DOI:10.18503/2311-8318-2016-4(33)-78-86.

11. *Белоус А. И.* Полупроводниковая силовая техника / А. И. Белоус, С. А. Ефименко, А. С. Турцевич. — М.: Техносфера, 2013. — 216 с.

REFERENCES

1. Gorbachev, G. N., and E. E. Chaplygin. *Promyshlennaya ehlektronika*. M.: Ehnergoatomizdat, 1988.

2. Ivanov, A. V., E. A. Bekirov, and M. M. Asanov. “Analysis of network voltage parameters effect on operation on asynchronous machines.” *Stroitel’stvo i tekhnogennaya bezopasnost’* 3(55) (2016): 67–71.

3. Fuchs, Ewald, and Mohammad A. S. Masoum. *Power quality in power systems and electrical machines*. Academic press, 2015. DOI:10.1016/B978-0-12-800782-2.09989-9.

4. *Pravila Rossiiskogo Rechnogo Registra. Vol. 2*. M.: Rossiiskii rechnoi registr, 2017.

5. Russian Federation. State Standard GOST 32144-2013. Electric energy. Electromagnetic compatibility of technical equipment. Power quality limits in the public power supply systems. M: Standartinform, 2013.

6. Cytovich, L. I., M. M. Dudkin, A. V. Kachalov, and R. M. Rahmatulin. RU 2 373 624, IPC H 02 M 1/08. Fazosdvigayushchee ustrojstvo. Russian Federation, assignee. Publ. 20 Nov. 2009.

7. Sugakov, V. G., O. S. Khvatov, and N. S. Varlamov. RU 2 612 055, IPC G 01 R 25/00. Cifrovoe fazosmeshchayushchee ustrojstvo. Russian Federation, assignee. Publ. 2 March 2017.

8. Sugakov, V. G., N. S. Varlamov, and A. I. Meshkov. "Primenenie fazosmeshchayushchego ustroistva v usloviyakh nestabil'nosti chastoty pitayushchego napryazheniya." A*ktual'nye problemy elektroenergetiki: sbornik nauchno-tekhnicheskikh statei*. Nizhnii Novgorod: Nizhegorodskii gosudarstvennyi tekhnicheskii universitet im. R.E. Alekseeva, 2016: 168–172.

9. Rashid, Muhammad H., ed. Power electronics handbook: devices, circuits, and applications handbook. 3rd ed. Elsevier, 2011. DOI: 10.1016/B978-0-12-382036-5.00051-3.

10. Klimash, Vladimir S., and Thu Je Min. "Generic mathematical description and modeling of thyristor converters controlled by power line." *Electrotechnical Systems and Complexes* 4(33) (2016): 78–86. DOI:10.18503/2311-8318-2016-4(33)-78-86.

11. Belous, A. I. *Poluprovodnikovaya silovaya tekhnika*. M.: Tekhnosfera, 2013.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Сугаков Валерий Геннадьевич —
доктор технических наук, профессор
ФГБОУ ВО «Волжский государственный университет водного транспорта»
603951, Российская Федерация, Нижний Новгород, ул. Нестерова, 5
e-mail: *elektrikasp@mail.ru, electrotech@vgavt-nn.ru*

Варламов Никита Сергеевич — аспирант
Научный руководитель:
Сугаков Валерий Геннадьевич
ФГБОУ ВО «Волжский государственный университет водного транспорта»
603951, Российская Федерация, Нижний Новгород, ул. Нестерова, 5
e-mail: *varlamov_nikita@mail.ru*

Малышев Юрий Сергеевич —
кандидат технических наук, доцент
ФГБОУ ВО «Волжский государственный университет водного транспорта»
603951, Российская Федерация, Нижний Новгород, ул. Нестерова, 5
e-mail: *elektrikasp@mail.ru*

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Sugakov, Valerij G. —
Dr. of Technical Sciences, professor
Volga State University of Water Transport
5 Nesterova St., Nizhny Novgorod, 603951, Russian Federation
e-mail: *elektrikasp@mail.ru, electrotech@vgavt-nn.ru*

Varlamov, Nikita S. — Postgraduate
Supervisor:
Sugakov, Valerij G.
Volga State University of Water Transport
5 Nesterova St., Nizhny Novgorod, 603951, Russian Federation
e-mail: *varlamov_nikita@mail.ru*

Malyshev, Yury S. —
PhD, associate professor
Volga State University of Water Transport
5 Nesterova St., Nizhny Novgorod, 603951, Russian Federation
e-mail: *elektrikasp@mail.ru*

Статья поступила в редакцию 24 мая 2017 г.
Received: May 24, 2017.

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

DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-4-838-848

ESTIMATION OF INTEGRAL CHARACTERISTICS OF ENERGY CONSUMPTION IN MARINE POWER SYSTEMS WITH SEMICONDUCTOR CONVERTERS

V. M. Prikhodko, I. V. Prikhodko

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

The article shows that the analysis of power consumption in marine power systems with semiconductor converters, it is necessary to consider these properties as a large number of switching valves on the period of work, the presence of time intervals in the period of operation of the marine power systems for which the system components are disconnected from each other, distortion of currents and voltages variable nature of the intensity of the transformation of electricity into other forms. In ship operational conditions of the above properties of semiconductor converters lead to non-linear characteristics of the marine power systems and the need to consider such systems as nonlinear circuits with valves. Provided that for the purpose of evaluating the effectiveness of generating electrical energy, its consumption and conversion to linear marine power systems are widely used concepts of reactive, active and apparent power, which have strict physical meaning. It is confirmed that when evaluating the energy characteristics of the marine power systems with semiconductor converters transfer the formal mathematical apparatus developed for linear power circuits, in some cases leads to incorrect results and does not reflect the real physical processes. The energy characteristics of the marine power systems with semiconductor converters, the definition of which is based on adequate mathematical apparatus.

The most common notion of the integral of reactive power for nonlinear power systems. Presents qualitatively different approach to the analysis of energy processes in nonlinear electric systems, based on the rating curve of the instantaneous power that contains sufficient information about the physical processes. Revealed that is a promising method for the assessment of energy processes in marine power systems with non-sinusoidal currents and voltages through the concept of exchange energy, reflecting the intensity of the physical processes of the exchange of electromagnetic energy between separate parts of an electric circuit. The evaluation of correctness of the use of different methods of calculating reactive power. It is established that the method of determining exchange and reactive energy exchange processes reflect the real physical processes, reveals the contradictions and the errors of the formal approach.

Keywords: ship electric power systems, semiconductor converters, reactive power, integrated features, exchange energy, exchange power, electricity.

For citation:
Prikhodko, Valentin M., and Irina V. Prikhodko. "Estimation of integral characteristics of energy consumption in marine power systems with semiconductor converters." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 9.4 (2017): 838–848. DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-4-838-848.

УДК 629. 12. 066

ОЦЕНКА ИНТЕГРАЛЬНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ЭЛЕКТРОПОТРЕБЛЕНИЯ В СУДОВЫХ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ С ПОЛУПРОВОДНИКОВЫМИ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯМИ

В. М. Приходько, И. В. Приходько

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

Доказано, что при анализе электропотребления в судовых электроэнергетических системах с полупроводниковыми преобразователями необходимо учитывать такие их свойства, как большое число переключений вентилей на периоде работы, наличие интервалов времени на периоде работы судовых электроэнергетических систем, в течение которых элементы системы отключены друг от друга, искажения токов

и напряжений, переменный характер интенсивности преобразования электроэнергии в другие виды. В судовых эксплуатационных условиях перечисленные свойства полупроводниковых преобразователей приводят к нелинейным характеристикам судовых электроэнергетических систем и необходимости рассмотрения таких электросистем, как нелинейные цепи с вентилями. Показано, что с целью оценки эффективности генерирования электрической энергии, её потребления и преобразования в линейных судовых электроэнергетических системах широко применяются понятия реактивной, активной и полной мощностей, которые имеют строгий физический смысл. Подтверждено, что при оценке энергетических характеристик судовых электроэнергетических систем с полупроводниковыми преобразователями формальный перенос математического аппарата, разработанного для линейных электроэнергетических цепей, в ряде случаев приводит к ошибочным результатам и не отражает реальные физические процессы. Рассмотрены энергетические характеристики судовых электроэнергетических систем с полупроводниковыми преобразователями, определение которых основано на адекватном им математическом аппарате.

Приведены наиболее распространённые понятия интегральной реактивной мощности для нелинейных электроэнергетических систем. Представлен качественно новый подход при анализе энергетических процессов в нелинейных электросистемах, основанный на оценке кривой мгновенной мощности, содержащей достаточно полную информацию о физических процессах. Выявлено, что перспективным является метод оценки энергетических процессов в судовых электроэнергетических системах с несинусоидальными токами и напряжениями посредством понятия обменной энергии, отражающего интенсивность физических процессов обмена электромагнитной энергией между отдельными частями электрической цепи. Проведена оценка корректности использования различных методов расчета реактивной мощности. Установлено, что метод определения обменной и реактивной энергии на базе обменных процессов отражает реальные физические процессы, позволяет вскрыть существующие противоречия и исключить ошибки формального подхода.

Ключевые слова: судовые электроэнергетические системы, полупроводниковые преобразователи, реактивная мощность, интегральные характеристики, обменная энергия, обменная мощность, электропотребление.

Для цитирования:
Приходько В. М. Оценка интегральных характеристик электропотребления в судовых электроэнергетических системах с полупроводниковыми преобразователями / В. М. Приходько, И. В. Приходько // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2017. — Т. 9. — № 4. — С. 838–848. DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-4-838-848.

Введение

Интенсивное развитие судовых электротехнических комплексов и систем, связанное с широким внедрением полупроводниковых преобразователей морского исполнения, а также непрерывное увеличение их установленной мощности обусловливают актуальность выбора оптимальных силовых схем мощных преобразователей, от которых зависят интегральные характеристики электропотребления, электромагнитная совместимость полупроводниковых преобразователей с питающей судовой сетью и нагрузкой, возрастание добавочных потерь, сбой в работе устройств синхронизации, автоматики, вычислительной техники и систем управления.

Как известно, выбор структур силовых схем полупроводниковых преобразователей определяет область их использования и целесообразность применения в судовых электроэнергетических системах при решении конкретных задач, например, для питания электроприводов, заряда аккумуляторных батарей или электроснабжения судовой силовой нагрузки общего назначения, а также в системах катодной защиты корпусов морских судов от коррозии. Среди различных типов судовых полупроводниковых преобразователей наиболее эффективны многофазные преобразователи, обеспечивающие повышенную кратность частоты пульсации выходного напряжения в отличие от традиционной трехфазной мостовой схемы, принятой на судах различного назначения в качестве базовой схемы преобразования. Применение многофазных или многополюсных полупроводниковых преобразователей считается одним из наиболее эффективных методов уменьшения влияния мощных преобразователей на питающую судовую сеть и нагрузку, а также обеспечения оптимальных интегральных характеристик электропотребления в судовых электроэнергетических системах с полупроводниковыми преобразователями.

В рыночной экономике получило развитие новое направление построения схем выпрямления, обладающих улучшенными технико-экономическими показателями, обеспечивающими оптимальные интегральные характеристики электропотребления в судовых электроэнергетических системах с полупроводниковыми преобразователями. Среди схемных решений полупроводниковых преобразователей определенный интерес представляют технические решения выпрямительных агрегатов, эффективность работы которых исследована методами математического моделирования в MC и / или Matlab в работе [1], обеспечивающих повышенную кратность частоты пульсации выходного напряжения с помощью интегрированных трансформаторных преобразователей числа фаз (ТПЧФ).

Поскольку полупроводниковые преобразователи представляют собой комплекс силовых трансформаторов и полупроводниковых коммутаторов, уменьшение влияния судового преобразователя на питающую сеть и повышение качества выходного напряжения достигается за счет использования многофазных трансформаторов. Сравнительный анализ [1] позволил выделить несколько характерных принципов формирования согласующим трансформатором многофазной системы напряжений, необходимой для работы блока силовых вентилей: применение двухфазного базиса (схемы Скотта), использование трехфазного базиса и различных схем соединения секций обмоток, а также внедрение явления вращающегося магнитного поля.

Современные достижения в области трансформаторостроения и преобразовательной техники позволяют создавать интегрированные многопульсные выпрямительные агрегаты, которые могут удовлетворять возросшие в настоящее время требования к электромагнитной совместимости между различными потребителями электрической энергии и питающей сетью. В работах [2], [3] установлено, что способ повышения эффективности управляемого выпрямителя на базе трансформатора с вращающимся магнитным полем (ТВМП) за счет использования нескольких круговых обмоток позволяет уменьшить коэффициент пульсаций выпрямителя с двумя трехсекционными круговыми обмотками до 2,25 %, а с двумя 15-секционными круговыми обмотками — до 0,13 %. На основе анализа принципов построения ТПЧФ, а также отечественных и зарубежных разработок в [1] – [3] выделены конструктивные преимущества ТВМП по сравнению с другими рассмотренными типами ТПЧФ: произвольная фазность выходной системы напряжений, высокая степень симметрии обмоток отдельных фаз при любой фазности полупроводникового преобразователя.

Анализ существующих в настоящее время схемных решений многопульсных полупроводниковых выпрямителей, обеспечивающих повышенную кратность частоты пульсации выходного напряжения посредством интегрированных ТПЧФ, позволяет сделать заключение, что наибольшее распространение получили несколько принципов построения ТПЧФ, основанных на использовании двухфазного базиса (схемы Скотта), трехфазного базиса и замкнутых или разомкнутых схем соединения секций обмоток, а также явление вращающегося магнитного поля. В рыночных экономических условиях повышена эффективность полупроводниковых преобразователей, построенных на базе трансформаторов с вращающимися магнитными полями, за счет совершенствования силовых схем преобразователей и алгоритмов управления силовыми ключами полупроводниковых коммутаторов, переключающих отводы выходных круговых обмоток трансформаторов с вращающимися магнитными полями, что подтверждается работой [3].

Методы и материалы

В настоящее время значительное повышение роли судовой преобразовательной техники (выпрямителей, тиристорных преобразователей постоянного тока, инверторов, полупроводниковых преобразователей частоты, тиристорных преобразователей постоянного напряжения) как основы совершенствования существующих традиционных и создания качественно новых инновационных технологий привело к массовому использованию на судах преобразовательных устройств в составе судовых электроэнергетических систем (СЭЭС) и автоматизированных гребных электрических установок (ГЭУ). При анализе электропотребления в СЭЭС и ГЭУ с по-

лупроводниковыми преобразователями требуется учитывать такие их свойства, как большое число переключений вентилей в период работы *T*, наличие интервалов времени в период работы СЭЭС, в течение которых элементы системы отключены друг от друга, наблюдаются искажения токов и напряжений, переменный характер интенсивности преобразования электрической энергии в другие виды. На судах морского, речного и рыбопромыслового флотов перечисленные свойства полупроводниковых преобразователей обусловливают нелинейные характеристики СЭЭС и ГЭУ с преобразователями и необходимость рассмотрения таких электросистем как нелинейных цепей с вентилями.

На судах при анализе энергетических характеристик в СЭЭС и ГЭУ с полупроводниковыми статическими преобразователями формальный перенос математического аппарата, разработанного для линейных электрических цепей, в ряде случаев приводит к ошибочным результатам и не отражает реальные физические процессы. Таким образом, разделение энергии, поступающей от судовых генераторов, на активную, реактивную и другие составляющие для электрических систем с полупроводниковыми преобразователями оказывается неэффективным. Поэтому экономически целесообразно рассмотреть энергетические характеристики СЭЭС и ГЭУ с полупроводниковыми преобразователями, определение которых основано на адекватном математическом аппарате.

В работе [4] выявлено, что развитие судовой преобразовательной техники и все более широкое применение частотно-регулируемых электроприводов на судах обусловливают необходимость проведения измерений в электрических сетях с несинусоидальными токами и напряжениями. В таких судовых электрических сетях измерение тока, напряжения, полной мощности и её активной и реактивных составляющих сопряжено с рядом технических и методических трудностей [5].

В частности, в цепях преобразователей частоты для питания линейных асинхронных электродвигателей морского исполнения частота изменяется от 0 до 50 Гц при основном диапазоне регулирования 0 – 5 Гц. Причем скорость регулирования частоты соизмерима с длительностью периода несинусоидальных тока и напряжения. В этих условиях на судах не могут быть применены традиционные способы измерения составляющих полной мощности. В СЭЭС с полупроводниковыми преобразователями частоты широкий спектр гармонических составляющих в токах и напряжениях приводит к тому, что существует трудность регистрации перехода тока (напряжения) через нуль и определения длительности их периода. Поэтому интегральные способы измерения мощности при быстром изменении частоты являются неэффективными в судовых эксплуатационных условиях. В связи с этим необходим такой метод измерения составляющих полной мощности, который позволял бы проводить измерения в темпе изменения частоты в судовых нелинейных цепях, в которых текущее значение частоты неизвестно, а формы кривых тока и напряжения произвольны.

В работе [4] установлено, что измерения составляющих мощности при таких условиях на судах являются возможными. Известно, что если в синусоидальной цепи ток и напряжение совпадают по фазе, то реактивная составляющая мощности равна нулю, а кривая мгновенной мощности $p = ui$ не заходит в область отрицательных значений p. Когда угол между током и напряжением равен 90 °, реактивная мощность равна полной, а кривая мгновенной мощности $p = ui$ симметрична относительно нулевой оси. Таким образом, мерой реактивной мощности могут являться степень смещения кривой мгновенной мощности относительно нуля и ее амплитуда.

На судах контроль величины активной и реактивной мощности в цепях регулируемых статических преобразователей частоты необходимо производить по интегральным значениям положительной и отрицательной составляющих сигнала мгновенной мощности. В качестве меры реактивной мощности может быть принята степень смещения сигнала мгновенной мощности относительно нулевой оси, что выражается через отношение сигналов положительной и отрицательной составляющих мгновенной мощности.

Автором научной монографии [6] определены параметры компенсаторов реактивной мощности, представляющих собой фактически параметрические оптимизаторы, содержащие реактивные элементы, величины которых должны выбираться в зависимости от конкретного стационарного режима. Для статического компенсатора при соединении реактивных элементов по схеме «треугольник» процесс оптимизации состоит в оценке величин трех элементов, доставляющих минимум целевой функции (критерию качества) в форме суммы квадратов линейных токов судовой трехфазной системы. Для оценки эффективности генерирования электроэнергии, ее потребления и преобразования в линейных системах широко используются понятия реактивной Q, активной P и полной S мощностей. Связь между этими величинами устанавливается соотношением

$$S^2 = P^2 + Q^2, \tag{1}$$

где

$$P = UI \cdot \cos\left(\varphi_u - \varphi_i\right) = UI \cdot \cos\varphi; \tag{2}$$

$$Q = UI \cdot \sin(\varphi_u - \varphi_i) = UI \cdot \sin\varphi; \tag{3}$$

$S = UI = \frac{U_м}{\sqrt{2}} \cdot \frac{I_м}{\sqrt{2}}$; U — действующее значение напряжения; $u(t) = U_м \cdot \sin(\omega t + \varphi_u)$; I — действующее значение тока $i(t) = I_м \cdot \sin(\omega t + \varphi_i)$; $\varphi = \varphi_u - \varphi_i$.

Величины P, Q, S имеют строгий физический смысл.

Для синусоидальных функций между интегральными и мгновенными характеристиками существует однозначная связь, поскольку по информации в точке можно установить вид всей функции. Для линейных систем интегральные характеристики (2), (3) несут информацию о мгновенных значениях функций $u(t)$ и $i(t)$. При малых значениях φ изменение величин P и Q приводит к пропорциональному изменению угла φ сдвига фаз между $u(t)$ и $i(t)$. Действительно, при неизменном значении потребляемой активной мощности P угол φ регулируется изменением реактивной мощности Q, так как имеет место соотношение $\varphi = \operatorname{arctg}(Q/P) \approx Q/P$.

Простота составления энергетического баланса (1), отражение реальных физических процессов в линейных системах и связи между интегральными и мгновенными характеристиками привели к переносу понятия ортогональной системы мощностей (1) – (3) на нелинейные цепи с несинусоидальными напряжениями и токами, какими являются системы с преобразователями. При этом ортогональные системы используются не только для оценки характеристик электропотребления, но и для регулирования оптимального электропотребления. Однако, если понятие активной мощности имеет строгий физический смысл, то при распространении понятия реактивной мощности на нелинейные системы теряется ясная связь с физическими процессами в накопителях электромагнитной энергии, появляются затруднения при толковании ряда результатов применения введенной реактивной мощности.

Приведем наиболее распространенные понятия интегральной реактивной мощности для нелинейных систем:

1) интегральная реактивная мощность по Фризе

$$Q_Ф = \sqrt{S^2 - P^2} = \sqrt{\sum_k U_k^2 \sum_k I_k^2 - \left(\sum_k P_k\right)^2}; \tag{4}$$

2) интегральная реактивная мощность по Будеану

$$Q_B = \sum_k Q_k = \sum_k U_k I_k \sin\varphi_k, \tag{5}$$

где Q_k — реактивная мощность для k-х гармоник тока и напряжения, совпадающая с мощностью, полученной на основании преобразования Гильберта:

$$\mathrm{H}\{f(t)\} = \frac{1}{\pi}\int_{-\infty}^{\infty}\frac{g(\tau)}{\tau - t}d\tau;$$

3) мощность с использованием значений интеграла по времени от одной из определяющих функций:

$$Q_{\mathrm{И}} = \frac{\omega}{T}\int_0^T\left(\int u dt\right) i dt = -\frac{\omega}{T}\int_0^T\left(\int i dt\right) u dt = \sum_k \frac{1}{k} Q_k; \tag{6}$$

4) мощность с использованием значения производной по времени от одной из определяющих функций:

$$Q_{\mathrm{П}} = \frac{1}{\omega T}\int_0^T u\left(\frac{di}{dt}\right)dt = -\frac{1}{\omega T}\int_0^T i\left(\frac{du}{dt}\right)dt = \sum_k kQ_k; \tag{7}$$

5) обобщенная мощность при применении эквивалентной частоты:

$$Q_{\mathrm{О}} = \frac{\omega}{\omega_{\mathrm{э}}}Q_{\mathrm{П}} = \frac{\omega_{\mathrm{э}}}{\omega}Q_{\mathrm{И}} = \sqrt{Q_{\mathrm{П}}Q_{\mathrm{И}}} = \sqrt{\sum_k Q_k + \sum_{\substack{k,\mathrm{П}\\ k\neq\mathrm{П}}}\frac{k}{\mathrm{П}}Q_k Q_{\mathrm{П}}}; \tag{8}$$

6) реактивная мощность, определяемая на базе средних величин энергии, накопленной в магнитном ($\bar{W}_{\mathrm{м}}$) и электрическом ($\bar{W}_{\mathrm{э}}$) полях:

$$Q_{\mathrm{Н}} = UI = 2\omega\left(\bar{W}_{\mathrm{м}} - \bar{W}_{\mathrm{э}}\right); \tag{9}$$

7) реактивная мощность, состоящая из мощностей сдвига и искажения $Q_{\mathrm{и}}$:

$$Q_{\mathrm{СИ}} = \sqrt{Q_{\mathrm{с}}^2 + Q_{\mathrm{и}}^2}, \tag{10}$$

где

$$Q_{\mathrm{с}} = Q_B;\ Q_{\mathrm{и}} = \left\{\sum_{\substack{k,\mathrm{П}\\ k\neq\mathrm{П}}}\left[U_k^2 I_{\mathrm{П}}^2 + U_{\mathrm{П}}^2 I_k^2 - 2U_k I_{\mathrm{П}} U_{\mathrm{П}} I_k \cos\left(\varphi_k - \varphi_{\mathrm{П}}\right)\right]\right\}^{1/2}.$$

В ранее выполненных работах представлено различное определение реактивной мощности (формулы (4) – (10)), что привело к разным способам определения баланса энергии на основе ортогональных составляющих. Ортогональные системы, хоть и позволяют оценить долю мощностей, вызванную амплитудной и фазовой асимметрией, и применяются в практических расчетах, в конечном итоге, не могут быть рекомендованы для широкого применения в теоретических и практических расчетах при проведении баланса энергии в системах с преобразователями, поскольку они являются условными расчетными величинами и в общем случае не в полной мере адекватно отражают физические процессы.

В работе [7] получено выражение для действующего значения тока $i(t)$, из которого следует, что компенсация реактивной мощности Фризе аналогична минимизации действующего значения тока, протекающего от судового генератора к нагрузке. Минимизация в СЭЭС с полупроводниковыми преобразователями осуществляется посредством подключения параллельно судовой нагрузке компенсатора с током $i_k(t) = -i_p(t)$. Ортогонализация одной из функций в произведении (u, i) во многих случаях приводит к возможности учета тока $i_p(t)$. На основании такого подхода рассмотрено определение следующих реактивных мощностей: интегральной реактивной мощности по Будеану; мощности с использованием значения производной по времени от одной из определяющих функций напряжения или тока; мощности с использованием значений интеграла по времени от одной из определяющих функций напряжения или тока. Исследования [7] и [8] показали, что реактивная мощность Фризе является наиболее полной из рассмотренных определений реактивных мощностей характеристикой энергетических процессов в электроэнергетической системе. В СЭЭС использование реактивных мощностей Фризе Q_{Φ} и $Q_{\Phi\tau}$ как критериев оценки дополни-

тельных потерь при передаче, распределении электрической энергии на судах позволяет определить величину этих потерь как в установившихся, так и в переходных режимах.

Работа [9] посвящена исследованиям эффективности применения компенсатора реактивной мощности дискретного типа. Каждая из секций конденсаторов подключается к электрической сети с помощью последовательно соединенных с ними бесконтактных силовых коммутаторов, выполненных на основе мощных IGBT транзисторов. Главной отличительной особенностью разработанного компенсатора реактивной мощности дискретного типа по сравнению с используемыми в настоящее время устройствами является то, что для исключения всплесков тока в конденсаторных батареях при коммутациях подключение конденсаторов к электрической сети происходит не в любой момент времени, а в момент равенства мгновенного напряжения сети и остаточного напряжения на конденсаторах. Оригинальное построение силовой схемы статического транзисторного коммутатора сокращает количество коммутационной аппаратуры при достаточно широком диапазоне регулирования мощности конденсаторной батареи. В работе [9] в результате проведенных исследований получены аналитические соотношения, позволяющие рассчитать и выбрать параметры статического полупроводникового компенсатора реактивной мощности с учетом характеристик питающей сети. На основании выполненных теоретических и экспериментальных исследований для решения проблемы компенсации реактивной мощности в электроэнергетических системах экономически целесообразно применять статический полупроводниковый (транзисторный вместо тиристорного) компенсатор реактивной мощности дискретного типа.

Работы [5] – [11] показывают, что разные способы определения реактивной мощности приводят к различным результатам. Следовательно, применение ортогональных систем не позволяет достаточно точно осуществлять оптимальное регулирование электропотребления в системах с преобразователями, в частности, осуществлять компенсацию энергии, выбор энергетического оборудования, определять энергетические показатели генерирования, преобразования и потребления энергии.

Результаты

Условность и неопределенность понятия реактивной мощности в системах с преобразователями предполагают, что способ ее расчета должен всегда оговариваться. В работах [5], [9] установлено, что такая неоднозначность реактивной мощности в построении ортогональных систем приводит к ограничению их применения при теоретических и экспериментальных исследованиях СЭЭС с полупроводниковыми преобразователями.

Качественно другой подход при рассмотрении энергетических процессов в нелинейных системах основан на анализе кривой мгновенной мощности $p(t)$, содержащей достаточно полную информацию о физических процессах, которые изложены в работах [9] – [11]. Так, в работах [6], [9], [10] дана разносторонняя и глубокая оценка энергетических процессов в нелинейных системах. За счет декомпозиции мгновенной мощности $p(t)$ получены составляющие, отражающие направление передачи потока энергии, и энергетические коэффициенты, позволившие охарактеризовать системы с точки зрения эффективности использования энергии и степени ее уравновешенности. Однако при декомпозиции мгновенной мощности упор сделан на формальное разложение функции $p(t)$, интегральные характеристики и коэффициенты в определенной степени не учитывают реальные физические процессы. Данные характеристики не в полной мере отражают мгновенные процессы, что не позволяет с их помощью учитывать все свойства систем с преобразователями.

Базируясь на идее декомпозиции мгновенной мощности $p(t)$ для отображения характеристик в системе генератор – нагрузка предложено использовать характеристику переменного энергопотока:

$$W(t) - Pt = \int_0^t u(t)i(t)dt - \frac{t}{T}\int_0^T u(t)i(t)dt, \qquad (11)$$

выделяя при этом из выражения (11) величину $W_{LC}(t)$, отражающую энергию, накапливаемую в электромагнитном поле. Выражение (11) для периодических процессов является избыточным,

так как в этом случае достаточно иметь характеристику энергопотребления только на одном периоде. Предложенный способ анализа взаимодействия между источником и потребителем электроэнергии ориентирован на наличие эквивалентной схемы, не учитывает переменную интенсивность преобразования энергии в другие виды, а также иные особенности систем с преобразователями.

Перспективным является способ оценки энергетических процессов в системах с несинусоидальными токами и напряжениями с помощью понятия обменной энергии, отражающего интенсивность физических процессов обмена электромагнитной энергией между отдельными частями электрической цепи. Если от генератора в нагрузку в течение интервала времени t^+ поступает энергия W^+, то обменная энергия определяется в виде:

$$W_{об} = W^+ - Pt^+, \tag{12}$$

где t^+ — интервал времени, в течение которого $p(t) = u(t)i(t) > 0$; P — активная (средняя за период) мощность.

Обсуждение

Обменная энергия определена для реактивной нагрузки. Проведена оценка корректности применения различных методов расчета реактивной мощности. Показано, что вычисление реактивной мощности Q на основе обменной мощности $Q_{об} = W_{об}/T(Q - \pi Q_{об})$ позволяет устранить неточности, возникающие при непосредственном использовании выражений (4) – (10). Если коэффициенты несинусоидальности токов и напряжений меньше 5 %, то погрешность определения реактивной мощности по первой гармонике Q_1 по сравнению со значениями Q, найденными через обменную мощность $\delta_1 = (Q - Q_1) \cdot 100\ \% / Q$ не превосходит 5 %, а среднее значение $\delta_{ср}$ — 3 – 4 %. Поэтому при уровне значимости, отвечающем интегральной вероятности 95 %, погрешность, равная 5 %, может считаться вполне приемлемой, и при соответствии качества электроэнергии требованиям ГОСТ 13109-67 вполне допустимо оценивать значение реактивной мощности по первым гармоникам напряжения и тока. Когда коэффициенты несинусоидальности превышают 5 %, что имеет место в системах с преобразователями, известные интегральные характеристики не отражают реальные процессы в системах с преобразователями.

Способ определения обменной и реактивной энергии на основе обменных процессов отражает реальные физические процессы, позволяет вскрыть существующие противоречия и избежать ошибок формального подхода, что предопределило его значительные потенциальные возможности. Предложенное определение обменной энергии не учитывает переменную интенсивность преобразования электромагнитной энергии в другие виды, а также наличие в период работы системы с преобразователями интервалов времени, в течение которых элементы системы отключены друг от друга. Применение обменной энергии $W_{об}$, согласно выражению (12), в ряде случаев может привести к недопустимым погрешностям.

Интегральные характеристики широко применяются в качестве параметра регулирования электропотребления, например, для компенсации энергии, управления энергетическими процессами в электросистемах, в том числе в судовых, которые рассмотрены в работах [10], [12]. Так, в работе [11] осуществлена практическая проверка возможности резонансных явлений и компенсации гармоник компенсатором на IGBT транзисторах. Рассмотрены особенности резонансных явлений в электроэнергетических системах питания судов с берега с мощными полупроводниковыми преобразователями, вызванных высшими гармониками тока и напряжения, появляющимися в результате работы преобразователей. В работе [12] показано, что выбор силовых транзисторов производится по максимальному напряжению между коллектором и эмиттером и номинальному току через IGBT-транзистор. В разработанном компенсаторе реактивной мощности использованы силовые IGBT-транзисторные модули MITSUBISHI. Доказана возможность установки силовых модулей других производителей [13] – [19], имеющих идентичные основные параметры, как у IGBT-модулей MITSUBISHI.

Однако использование рассмотренных интегральных характеристик в качестве параметра регулирования энергии может оказаться нецелесообразным при наличии в системах резко несинусоидальных токов и напряжений (например, в электросистемах, содержащих дуговые электропечи, электрохимические устройства, электропривод, импульсные устройства и др.). Для цепей с несинусоидальными напряжениями и токами в последнее время разработан ряд алгоритмов компенсации энергии и регулирования ее потребления, основанных на учете реальных процессов энергообмена. Предложенные алгоритмы не позволяют решить в комплексе задачу оптимизации электропотребления в системах с преобразователями — обеспечить не только получение на нагрузке требуемой формы сигналов, но и оптимальные режимы работы как генераторов, преобразователей и нагрузок, так и электросистемы в целом.

Таким образом, разделение энергии, поступающей от генераторов, на активную, реактивную и другие составляющие для систем с преобразователями оказывается нецелесообразным.

Заключение

1. При расчете энергетических характеристик в судовых электроэнергетических системах с полупроводниковыми преобразователями необходимо оперировать кривой мгновенной мощности $p(t)$, учитывать реальные процессы и особенности таких систем.

2. С помощью интегральных характеристик целесообразно оценивать характер протекания электромагнитных процессов, а посредством мгновенных — осуществлять регулирование электропотребления.

3. При подведении баланса энергии в судовых электроэнергетических системах с полупроводниковыми преобразователями необходимо учитывать мгновенные характеристики.

4. Для построения системы коэффициентов эффективности преобразования энергии требуется совместное использование как интегральных, так и мгновенных характеристик.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Музыка М. М.* Исследование эффективности работы управляемых выпрямителей методами математического моделирования в MC и/или Matlab: монография / М. М. Музыка [и др.]; под ред. проф. А. И. Черевко. — Архангельск: САФУ имени М. В. Ломоносова, 2014. — 108 с.

2. *Черевко А. И.* Качество выходного напряжения выпрямителя, построенного на базе ТВМП, при четном и нечетном числе секций КО ТВМП / А. И. Черевко, М. М. Музыка, С. В. Платоненков [и др.] // Электротехника. — 2012. — № 4. — С. 41–45.

3. *Сакович И. А.* Качество выходного напряжения управляемого выпрямителя на базе трансформатора с вращающимся магнитным полем / И. А. Сакович, А. И. Черевко, С. В. Платоненков // Электричество. — 2016. — № 1. — С. 43–49.

4. *Гурьев В. В.* Валогенераторные установки нового поколения / В. В. Гурьев, А. В. Григорьев // Корабел. — 2013. — № 3 (21). — С. 94–95.

5. *Губанов Ю. А.* Электроснабжение и электропитание корабельных потребителей: работа по исправлению нагрузки / Ю. А. Губанов, К. В. Жданов, А. Г. Сотников, Д. С. Муликов // Морской вестник. — 2014. — № 1 (49). — С. 43–48.

6. *Приходько В. М.* Интенсификация комплексных испытаний судового электрооборудования по энергосберегающей технологии в судостроении и судоремонте: монография / В. М. Приходько. — СПб.: СПГУВК, 2013. — 244 с.

7. *Приходько В. М.* Реактивная мощность как критерий оценки потерь при распределении электроэнергии в судовых электроэнергетических системах / В. М. Приходько, И. В. Приходько // IV Международный Балтийский морской форум: материалы форума. — Калининград: Изд-во БГАРФ, 2016. — С. 247–251.

8. *Приходько В. М.* Критерий оценки потерь при распределении электроэнергии в судовых электроэнергетических системах / В. М. Приходько, И. В. Приходько // Региональная информатика (РИ-2016). Юбилейная XV Санкт-Петербургская междунар. конф. «Региональная информатика (РИ-2016)». Санкт-Петербург, 26 – 28 октября 2016 г.: материалы конф. — СПб.: РАН, 2016. — С. 314–315.

9. *Приходько В. М.* Эффективность компенсатора реактивной мощности дискретного типа / В. М. Приходько, М. Л. Ивлев, И. В. Приходько // Журнал Университета водных коммуникаций. — 2012. — № 3. — С. 68–75.

10. *Мелкауи Х.* Методы и средства комплексных испытаний электрооборудования по энергосберегающей технологии в судостроении и судоремонте: автореферат дис. на соиск. ... канд. техн. наук / Х. Мелкауи. — СПб.: ФГОУ ВПО СПГУВК, 2012. — 23 с.

11. *Приходько В. М.* Резонансные явления в электроэнергетических системах с полупроводниковыми преобразователями при питании судов с берега / В. М. Приходько, М. Л. Ивлев, И. В. Приходько // Журнал Университета водных коммуникаций. — 2013. — № 3 (19). — С. 28–34.

12. *Приходько В.* Транзисторный компенсатор реактивной мощности / В. Приходько, М. Ивлев, И. Приходько // Силовая электроника. — 2017. — Т. 1. — № 64. — С. 65–68.

13. *Azuma K.* New 3.3-kV IGBT Module with Low Power Loss and High Current Rating / K. Azuma, I. Yoshida, A. Konno, Y. Toyoda, K. Saito // Proc. PCIM Europe. — 2013. — Pp. 345–350.

14. *Toyota Y.* Novel 3.3-kV Advanced Trench HiGT with Low Loss and Low dv/dt Noise / Y. Toyota, S. Watanabe, T. Arai, M. Wakagi, M. Mori, M. Shinagawa, K. Azuma, Y. Shima, T. Oda, Y. Toyoda, K. Saito // Power Semiconductor Devices and ICs (ISPSD), 2013 25th International Symposium on. — IEEE, 2013. — Pp. 29–32. DOI: 10.1109/ISPSD.2013.6694391.

15. *Nagel A.* Robustness Requirements on Semiconductors for High Power Applications / A. Nagel, M. M. Bakran // Power Electronics and Applications (EPE), 2013 15th European Conference on. — IEEE, 2013. — Pp. 1–9. DOI: 10.1109/EPE.2013.6631910.

16. *Jones P. S.* Calculation of Power Losses for MMC-based VSC HVDC Stations / P. S. Jones, C. C. Davidson // Power Electronics and Applications (EPE), 2013 15th European Conference on. — IEEE, 2013. — Pp. 1–10. DOI: 10.1109/EPE.2013.6631955.

17. Application Manual (High voltage IGBT module). — Hitachi Power Semiconductor Device, Ltd., 2009. — 35 p.

18. *Кусима Т.* 1800 А/3,3 кВ IGBT-модуль с пазовой структурой затвора Advanced Trench HIGT и оптимизированной конструкцией / Т. Кусима, К. Адзума, Я. Нэмото [и др.] // Силовая электроника. — 2017. — Т. 1. — № 64. — С. 14–18.

19. *Хофштёттер Н.* Вопросы управления IGBT: однополярное управление, использование внешней емкости затвора / Н. Хофштёттер, П. Бекедаль, А. Колпаков // Силовая электроника. — 2017. — Т. 1. — № 64. — С. 21–26.

REFERENCES

1. Muzyka, M. M., et al. *Issledovanie effektivnosti raboty upravlyaemykh vypryamitelei metodami matematicheskogo modelirovaniya v MC i/ili Matlab: monografiya*. Arkhangel'sk: SAFU imeni N.V. Lomonosova, 2014.

2. Cherevko, A. I., M. M. Muzyka, S. V. Platonenkov, I. A. Sakovich, and I. Yu. Kuz'min. "Kachestvo vykhodnogo napryazheniya vypryamitelya, postroennogo na baze TVMP, pri chetnom i nechetnom chisle sektsii KO TVMP." *Elektrotekhnika* 4 (2012): 41–45.

3. Sakovich, I. A., A. I. Cherevko, and S. V. Platonenkov. "Kachestvo vykhodnogo napryazheniya upravlyaemogo vypryamitelya na baze transformatora s vrashchayushchimsya magnitnym polem." *Elektrichestvo* 1 (2016): 43–49.

4. Gur'ev, V. V., and A. V. Grigor'ev. "Valogeneratornye ustanovki novogo pokoleniya." *Korabel* 3(21) (2013): 94–95.

5. Gubanov, Yu. A., K. V. Zhdanov, A. G. Sotnikov, and D. S. Mulikov. "Elektrosnabzhenie i elektropitanie korabel'nykh potrebitelei: rabota po ispravleniyu nagruzki." *Morskoi vestnik* 1(49) (2014): 43–48.

6. Prihodko, V. M. *Intensifikacija kompleksnyh ispytanij sudovogo jelektrooborudovanija po jenergosberegajushhej tehnologii v sudostroenii i sudoremonte: nauch. monogr.* SPb.: SPGUVK, 2013.

7. Prikhod'ko, V. M., and I. V. Prikhod'ko. "Reaktivnaya moshchnost' kak kriterii otsenki poter' pri raspredelenii elektroenergii v sudovykh elektroenergeticheskikh sistemakh." *IV Mezhdunarodnyi Baltiiskii morskoi forum: materialy Mezhdunarodnogo morskogo foruma*. Kaliningrad: Izd-vo BGARF, 2016: 247–251.

8. Prikhod'ko, V. M., and I. V. Prikhod'ko. "Kriterii otsenki poter' pri raspredelenii elektroenergii v sudovykh elektroenergeticheskikh sistemakh." *Regional'naya informatika (RI-2016). Yubileinaya KhV Sankt-Peter-*

burgskaya mezhdunarodnaya konferentsiya «Regional'naya informatika (RI-2016)». Sankt-Peterburg, 26-28 oktyabrya 2016 g.: Materialy konferentsii. SPb.: RAN, 2016: 314–315.

9. Prikhod'ko, V. M., M. L. Ivlev, and I. V. Prikhod'ko. "Effektivnost' kompensatora reaktivnoi moshchnosti diskretnogo tipa." *Zhurnal Universiteta vodnykh kommunikatsii* 3 (2012): 68–75.

10. Melkaui, H. Metody i sredstva kompleksnyh ispytanij jelektrooborudovanija po jenergosberegajushhej tehnologii v sudostroenii i sudoremonte. Abstract of PhD diss. SPb.: FGOUVPO SPGUVK, 2012.

11. Prikhod'ko, V. M., M. L. Ivlev, and I. V. Prikhod'ko. "The resonant phenomena in electrical power systems with semiconductor converters at piatny of vessels from the coast." *Zhurnal Universiteta vodnykh kommunikatsii* 3(19) (2013): 28–34.

12. Prikhod'ko, V., M. Ivlev, and I. Prikhod'ko. "Tranzistornyi kompensator reaktivnoi moshchnosti." *Silovaya elektronika* 1.64 (2017): 65–68.

13. Azuma, K., I. Yoshida, A. Konno, Y. Toyoda, and K. Saito. "New 3.3-kV IGBT Module with Low Power Loss and High Current Rating." *Proc. PCIM Europe* (2013): 345–350.

14. Toyota, Y., S. Watanabe, T. Arai, M. Wakagi, M. Mori, M. Shinagawa, K. Azuma, Y. Shima, T. Oda, Y. Toyoda, and K. Saito. "Novel 3.3-kV Advanced Trench HiGT with Low Loss and Low dv/dt Noise." *Power Semiconductor Devices and ICs (ISPSD), 2013 25th International Symposium on*. IEEE, 2013: 29–32. DOI: 10.1109/ISPSD.2013.6694391.

15. Nagel, Andreas, and Mark M. Bakran. "Robustness requirements on semiconductors for high power applications." *Power Electronics and Applications (EPE), 2013 15th European Conference on*. IEEE, 2013: 1–9. DOI: 10.1109/EPE.2013.6631910.

16. Jones, Phil S., and Colin C. Davidson. "Calculation of power losses for MMC-based VSC HVDC stations." *Power Electronics and Applications (EPE), 2013 15th European Conference on*. IEEE, 2013: 1–10. DOI: 10.1109/EPE.2013.6631955.

17. *Application Manual (High voltage IGBT module).* Hitachi Power Semiconductor Device, Ltd., 2009.

18. Kusima, T., K. Adzuma, Ya. Nemoto, K. Saito, E. Koike, and V. Rentyuk. "1800 A/3,3 kV IGBT-modul' s pazovoi strukturoi zatvora Advanced Trench HIGT i optimizirovannoi konstruktsiei." *Silovaya elektronika* 1.64 (2017): 14–18.

19. Khofshtetter, N., P. Bekedal', and A. Kolpakov. "Voprosy upravleniya IGBT: odnopolyarnoe upravlenie, ispol'zovanie vneshnei emkosti zatvora." *Silovaya elektronika* 1.64 (2017): 21–26.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Приходько Валентин Макарович —
кандидат технических наук, профессор
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени
адмирала С. О. Макарова»
198035, Российская Федерация, Санкт-Петербург,
ул. Двинская, 5/7
e-mail: *prihodki-3@yandex.ru*, *kaf_saees@gumrf.ru*

Приходько Ирина Валентиновна —
старший преподаватель
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени
адмирала С. О. Макарова»
198035, Российская Федерация, Санкт-Петербург,
ул. Двинская, 5/7
e-mail: *prihodki-3@yandex.ru*, *kaf_upvt@gumrf.ru*

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Prikhodko, Valentin M. —
PhD, professor
Admiral Makarov State University of Maritime
and Inland Shipping
5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg, 198035,
Russian Federation
e-mail: *prihodki-3@yandex.ru*, *kaf_saees@gumrf.ru*

Prikhodko, Irina V. —
Senior Lecturer
Admiral Makarov State University of Maritime
and Inland Shipping
5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg, 198035,
Russian Federation
e-mail: *prihodki-3@yandex.ru*, *kaf_upvt@gumrf.ru*

Статья поступила в редакцию 27 апреля 2017 г.
Received: April 27, 2017.

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

ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И АВТОМАТИЗАЦИЯ НА ТРАНСПОРТЕ

DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-4-849-865

RESEARCH METHODS OF PLANNING PROCESSES IN ADAPTIVE AUTOMATIZED MANUFACTURING CONTROL SYSTEMS

V. D. Chertovskoy

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

In this article Research Problem of Planning Process in new class of Automatized Control System was considered. It was marked that traditional Automatized Manufacturing Control Systems was received wide Spread. It was showed that these Systems, working only with «direct count» tasks, satisfy modern requirements not full measure. It touches of Control Processes Optimization and Registration of high Market Dynamic. These Lacks haven't in new Systems Class – adaptive Systems. Basic Systems Features were determined, three-levels Structure "leader – dispatcher – shop superior" with horizontal and vertical Connections was exposed, Requirements to Methods of mathematical Description were formed. Methods Analyses was organized. Local and system Methods were assigned. Local Methods describe separate Structure Elements and don't satisfy to delivered Requirements. It was showed that many System Methods operation with two-level Structures and three-level Structures have only one Element on each Level with complicated Algorithms.. Suggested by Author integral and homogeneous Methods satisfy Requirements the full.

In integral Method Planning Process describes by linear programming Task and Control Process – by linear quadratic Optimization Task. Homogeneous Method is preferred and used for Planning and Control Processes dynamic linear programming Task that consists of static linear Task and differential Equations. Homogeneous Method was described in more detail. It allowed to create multiple approbated Computer Model working in optimal Regime, recording Transition Procedure to Output of new Product. Model can use in Control Process of real System. Homogeneous Method allowed to generate numerical data for Model Adjust.

Keywords: adaptive automatized systems manufacturing planning control global local methods.

For citation:
Chertovskoy, Vladimir D. "Research methods of planning processes in adaptive automatized manufacturing control systems." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova* 9.4 (2017): 849–865. DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-4-849-865.

УДК 681.322

МЕТОДЫ ИЗУЧЕНИЯ ПРОЦЕССОВ ПЛАНИРОВАНИЯ В ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ СИСТЕМАХ УПРАВЛЕНИЯ ПРОИЗВОДСТВОМ

В. Д. Чертовской

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

В работе рассмотрена проблема исследования процессов планирования в новом классе автоматизированных систем управления. Отмечается, что традиционные автоматизированные системы управления производством получили широкое распространение. Показано, что эти системы, работающие только с задачами «прямого счета», не в полной мере удовлетворяют современным требованиям, особенно в части оптимизации процессов планирования и учета высокой динамичности рынка. Указанные недостатки отсутствуют в новом специфическом классе систем — адаптивных системах, для которых необходимо сформировать новые адекватные методы математического описания.

Определены основные особенности систем, для которых выявлена трехуровневая структура: «руководитель — диспетчер — начальники цехов» с горизонтальными и вертикальными связями, и сформулированы требования к методам описания для их сравнительного анализа. Методы разделены на локальные и системные. Локальные методы описывают порознь отдельные структурные элементы и не удовлетворяют поставленным требованиям. Показано, что большинство системных методов оперирует с двухуровневыми структурами, а в трехуровневых структурах на каждом уровне имеется по одному структурному элементу. Динамика процесса, как правило, не учитывается.

Среди системных методов наиболее полно удовлетворяют требованиям предложенные автором интегральный и однородный методы. В интегральном методе процесс планирования описывается задачей линейного программирования, а процесс управления — задачей линейно-квадратичной оптимизации. Более предпочтительным оказался однородный метод, в котором для процессов планирования и управления использована задача динамического линейного программирования как совокупность методов статического линейного программирования и разностных уравнений. Однородный метод позволил создать многократно апробированную компьютерную модель, работающую в оптимальном режиме, учитывающую процедуру оперативного перехода на выпуск новой продукции. Модель может быть использована в процессе управления реальной системой. Метод дал возможность генерировать числовые данные, необходимые для отладки модели.

Ключевые слова: адаптивные автоматизированные системы, производство, планирование, управление, глобальные локальные методы.

Для цитирования:
Чертовской В. Д. Методы изучения процессов планирования в интеллектуальных автоматизированных системах управления производством / В. Д. Чертовской // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2017. — Т. 9. — № 4. — С. 849–865.
DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-4-849-865.

Введение

Одним из эффективных направлений решения актуальной задачи создания в стране цифровой экономики в таких отраслях, как судостроение, судоремонт, машиностроение, является формирование интеллектуальных автоматизированных систем управления производством. Успех работы интеллектуальных систем в значительной мере определяется использованием эффективных методов математического описания системных процессов. Для выявления таких методов необходимо провести их сравнительный анализ.

Традиционные автоматизированные системы появились в 60-е годы XX в. вследствие растущего количества предприятий и усложняющихся информационных и информационно-экономических связей [1]. Подсистемное представление структуры автоматизированных систем показано на рис. 1.

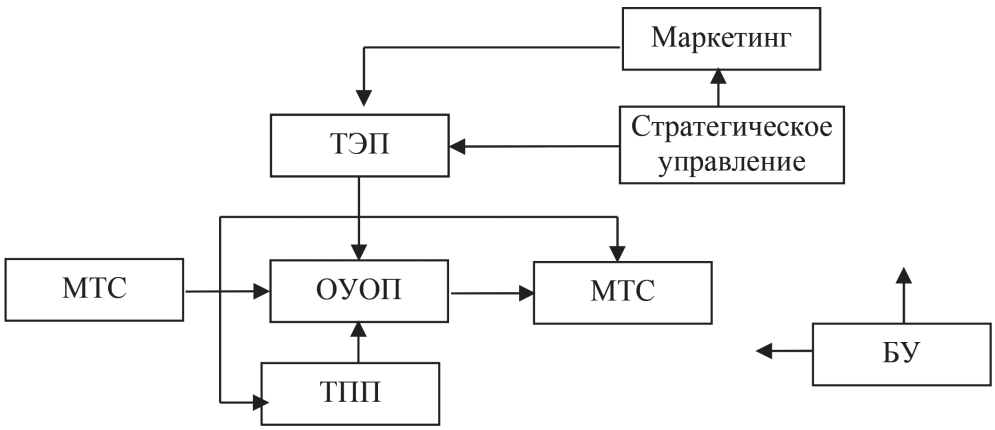


Рис. 1. Укрупненная схема связей функциональных подсистем при рыночных отношениях:
ТЭП — технико-экономическое планирование;
ОУОП — оперативное управление основным производством;
МТС — материально-техническое снабжение и сбыт;
ТПП — техническая подготовка производства; *БУ* — бухгалтерский учет

Первоначально системы работали в рамках плановой экономики со слабой динамичностью внешней среды. Основными алгоритмами являлись алгоритмы «прямого счета», не выходящие за четыре действия арифметики, для процедур планирования, учета и контроля. В то же время анализ процесса управления позволил сформировать схему цикла управления (рис. 2), впервые предложенную автором в 1980 г. [2] и закрепленную в 90-х годах XX в. в международном стандарте ИСО 9000.

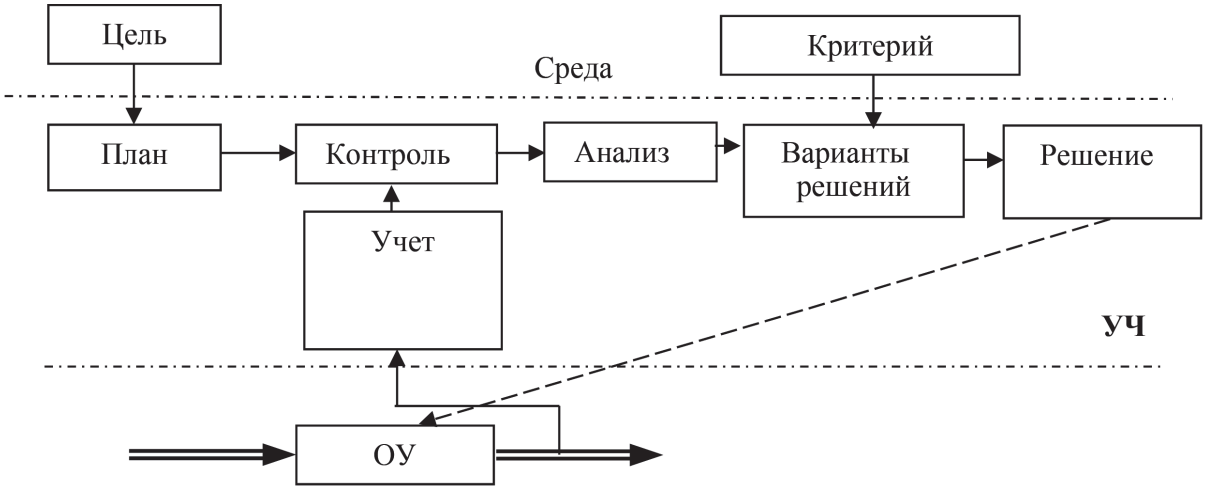


Рис. 2. Схема цикла управления:
ОУ — объект управления; *УЧ* — управляющая часть

Схема цикла управления позволила показать, что в системах решались статические, как правило, неоптимальные задачи на этапах планирования, учета и контроля в информационно-поисковом режиме. Остальные этапы цикла оставались прерогативой человека. Однако уже к 80-м годам XX в. возникла необходимость в учете динамики среды и самой системы [3], в оптимизации процессов управления и построении высокоавтоматизированных систем, что возможно при компьютеризации процедур выработки решений-советов и их реализации.

Широко известные автоматизированные системы управления производством уже не в полной мере удовлетворяли условиям высокодинамичного рынка и растущей конкуренции. Все чаще приходилось обращаться к интеллектуальным системам [4] – [7], в которых состав вектора цели (спроса) изменялся в процедуре функционирования. Сложившиеся обстоятельства потребовали формирования адекватных методов математического описания и реализации интеллектуальных систем, о которых пойдет речь в данной работе.

Методы и материалы

Следует отметить, что для современных систем управления производством в приборо-, машино- и кораблестроении в легкой промышленности характерны изменения целей функционирования. Автоматизированные системы управления производством являются частью АСУ предприятия и охватывают подсистемы технико-экономического планирования и оперативного управления основным производством (*подсистемное представление*) или бизнес-процесс «Производство» (*процедурное представление*).

Системный анализ таких систем позволил выявить трехуровневую структуру (рис. 3), учитывающую всевозможные изменения масштабов по координатам и времени при переходе с уровня на уровень. Наличие большего числа уровней затрудняет расчеты из-за большой разницы во времени процессов самого верхнего и самого нижнего уровней. При наличии большего числа уровней целесообразнее использовать «скольжение» по ним трехуровневой структуры.

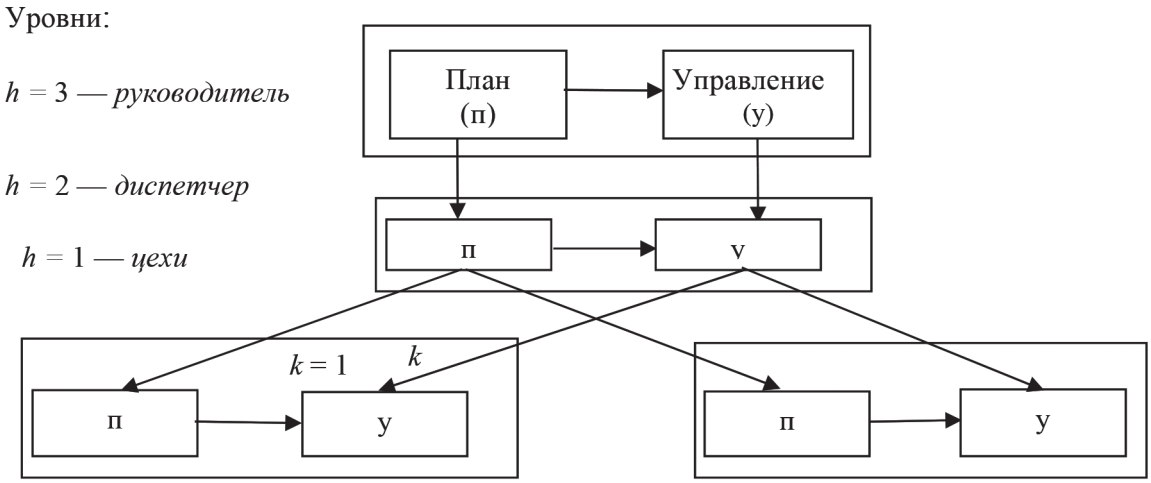


Рис. 3. Структура трехуровневой системы

Функциональное наполнение структуры системы при математическом исследовании процессов определяется спецификой системы. Укажем основные особенности, которые следует учитывать при формировании математического аппарата.

О1. Трехуровневая структура с вертикальными и горизонтальными связями, при этом на нижних уровнях имеется более одного структурного элемента.

О2. Изменение масштабов по координатам и времени при переходе с уровня на уровень.

О3. Связанные процессы планирования и управления во всех структурных элементах.

О4. Оптимальные методы процессов планирования и управления для наилучшего использования возможностей компьютеров.

О5. Оперативный переход на выпуск новой продукции.

О6. Однородность (однотипность) системного описания оптимальных процессов динамического планирования и нелинейного управления.

О7. Интеграция экономических и динамических свойств системы.

О8. Согласование экономических и координация динамических характеристик.

Указанным требованиям традиционные АСУ производства уже не удовлетворяли. Применяемые в них неоптимальные методы математического описания и алгоритмы можно разделить на две группы (табл. 1).

Таблица 1

Математические методы изначальных АСУ

Методы	Достоинства	Недостатки
Задачи «прямого счета», системы «Галактика», BAAN	Трехуровневая структура вида О1. Изменение масштабов (О2)	Только процесс планирования (О3). Неоптимальные алгоритмы «прямого счета». Невозможность оперативного перехода на выпуск новой продукции (О5)
Алгоритмы-ограничения	Трехуровневая структура вида О1. Изменение масштабов (О2)	Только процесс планирования (О3). Неоптимальные алгоритмы-ограничения. Невозможность оперативного перехода на выпуск новой продукции (О5)

Алгоритм «прямого счета» может может быть представлен в виде решения следующей задачи.

Задача «прямого счета» **(расчет плана по прибыли и рентабельности).** Введем следующие обозначения: $j = 1; J$ — вид выпускаемой продукции; $C_{\text{пр}j}$, $C_{\text{пр}}$ — прибыль от выпуска j-й продукции и всей продукции; P_j — количество j-й продукции, выпускаемой за год; S_j, S — соответственно цена единицы j-й продукции и стоимость всей продукции:

$$C_{\text{пр}} = \sum_{j=1}^{J} C_{\text{пр}j} P_J; \; S = \sum_{j=1}^{J} S_j P_J;$$

$$C_{\text{пр}} = \sum_{j=1}^{J} C_{\text{пр}j} P_j; \quad S = \sum_{j=1}^{J} S_j P_j.$$

Схема связей подобных задач функциональных подсистем [1] приведена на рис. 4.

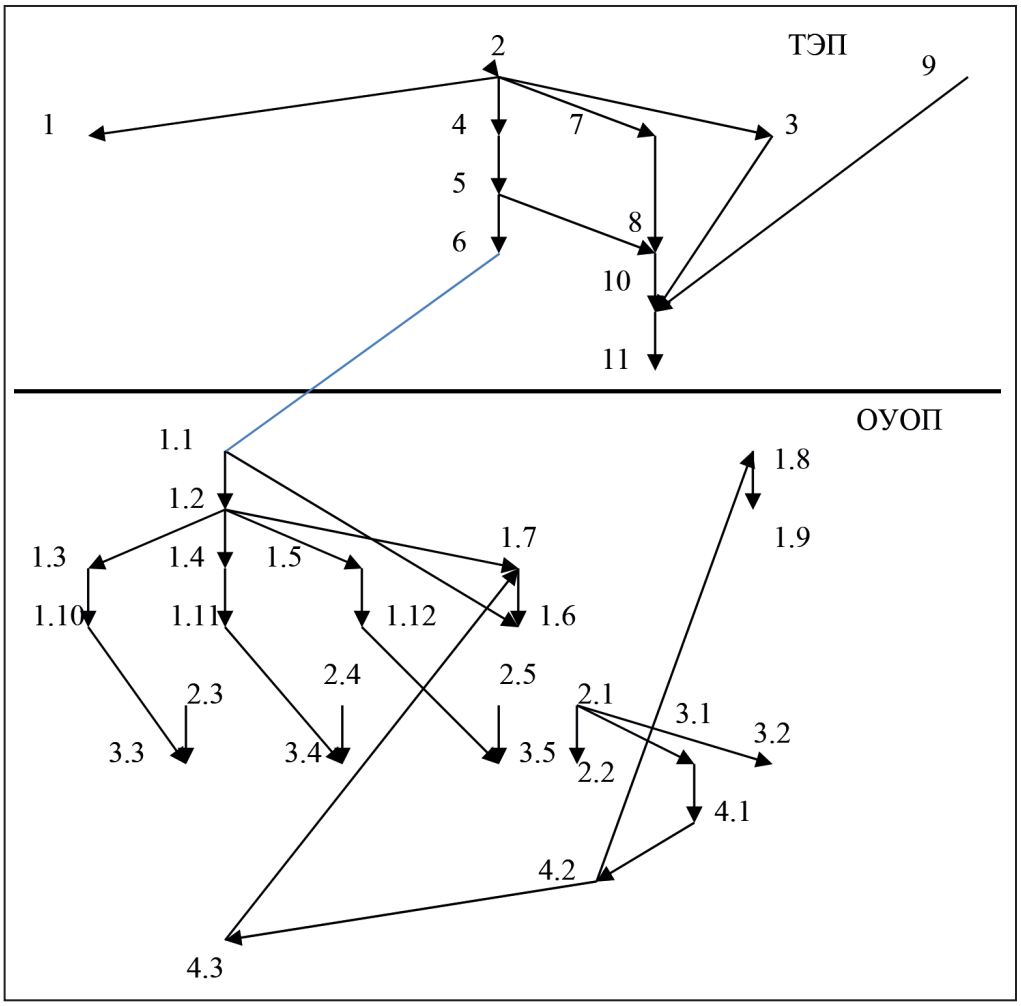


Рис. 4. Граф задач подсистем технико-экономического планирования и оперативного управления основным производством

Еще одной группой методов, распространенных в автоматизированном управлении, являются методы, сопровождающие Enterprise Resource Planning (ERP-системы) [8] и базирующиеся на ограничениях. ERP-системы хронологически прошли путь MRP- MRPII- ERP-CSRP. Material Requirement Planning (MRP) предполагал компьютерное определение потребностей в материалах в виде следующих ограничений: если a_{ij} — норма расхода материала на единицу продукции j, P_j — величина заказа клиента, b_i — наличное количество материала, то должно соблюдаться неравенство

$$\sum_{j=1}^{J} a_{ij} P_j \le b_i .$$

Manufacturing Resource Planning (MRPII) добавил расчет потребных мощностей (время работы оборудования). При этом решение задач-ограничений идет итеративно: вначале решают задачу для материальных ресурсов, затем — для мощностей.

В методе Advanced Planning and Scheduling (APS), получившем в отечественной литературе название «синхронное планирование и оптимизация — СПО», задачи-ограничения решаются совместно (синхронно). Это не устраняет, однако, итеративности расчета, но и оптимизация в методе отсутствует. В методе Customer Synchronized Resource Planning (CSRP) планирование ресурсов синхронизировано с действиями покупателей (клиентов). Соотношение перечисленных методов математического описания элементов системы показано на рис. 5. В его правой ветви отражены методы BPI — Business Process Improving; CPI — Continuous Process Improving — повышение качества продукции по критериям качества потребителей, но не рост прибыли любой ценой; BPR — Business Process Reingineering.

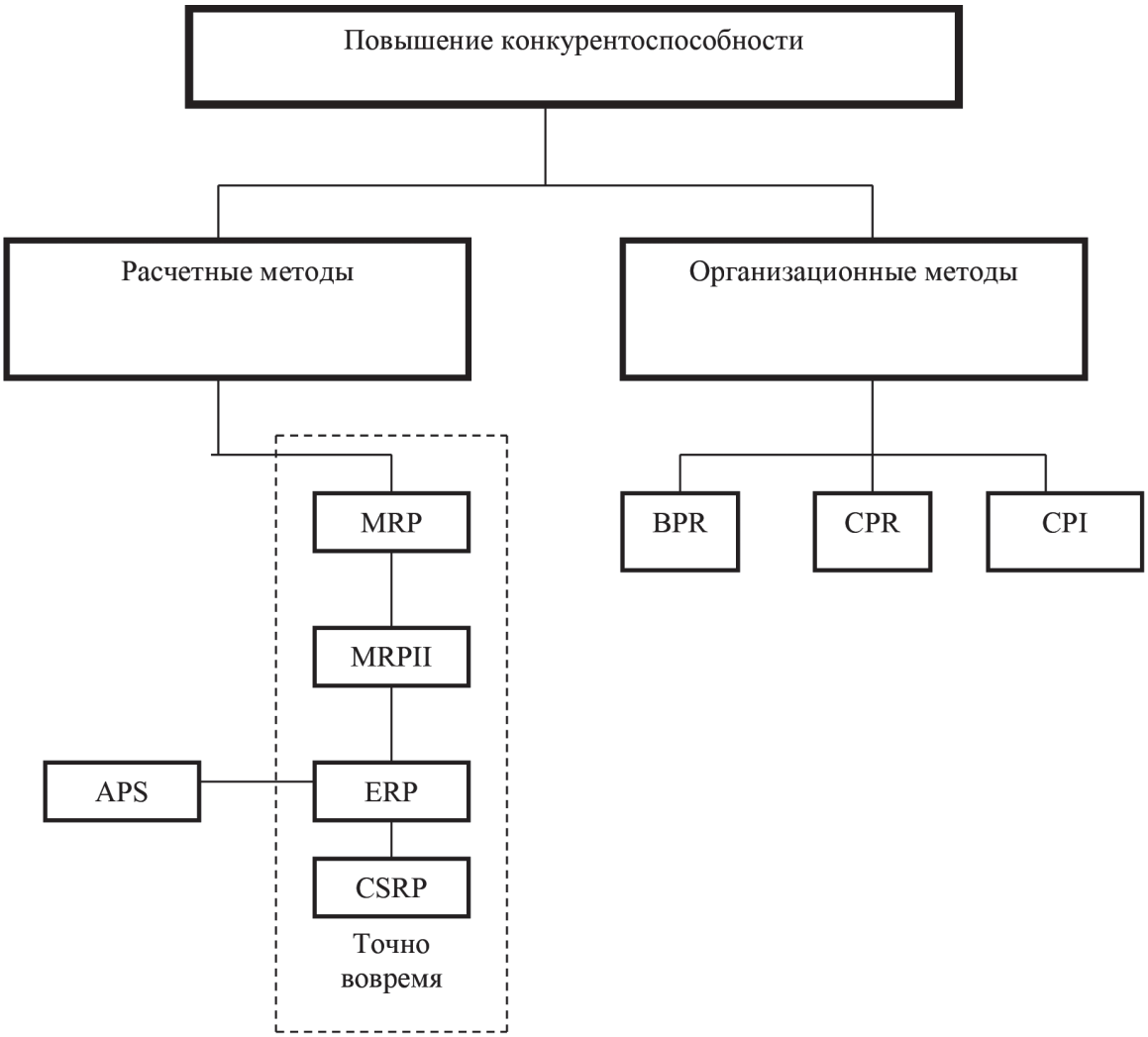


Рис. 5. Соотношение методов процедурного подхода

Первоначально рассматривались системы с двухуровневой структурой, а затем — с «веерной» [9]. Частотные методы оперируют, как правило, со скалярными величинами, тогда как современные системы характеризуются векторными величинами. Попытка [10] учета векторного характера не дала очевидных преимуществ по сравнению с методом пространства состояний,

с использованием которого позднее появилось множество работ. Автоматизированные двухуровневые системы впервые были рассмотрены в работе [11], в которой использовался теоретико-множественный аппарат описания, что не позволяло получать прикладные результаты.

Развитием предложенного направления явились двухуровневые системы оптимального планирования [12], для описания которых использовался аппарат статического линейного программирования. Фактически процедуру решения одноуровневой задачи трансформируют в двухуровневую процедуру. Целевые функции уровней согласованы постановкой задачи, что встречается не всегда. Заметим, что интервалы времени на разных уровнях одинаковы. Общая структура таких систем представлена на рис. 6, *а*. Ее частным случаем является структура с последовательным соединением подсистем (рис. 6, *б*).

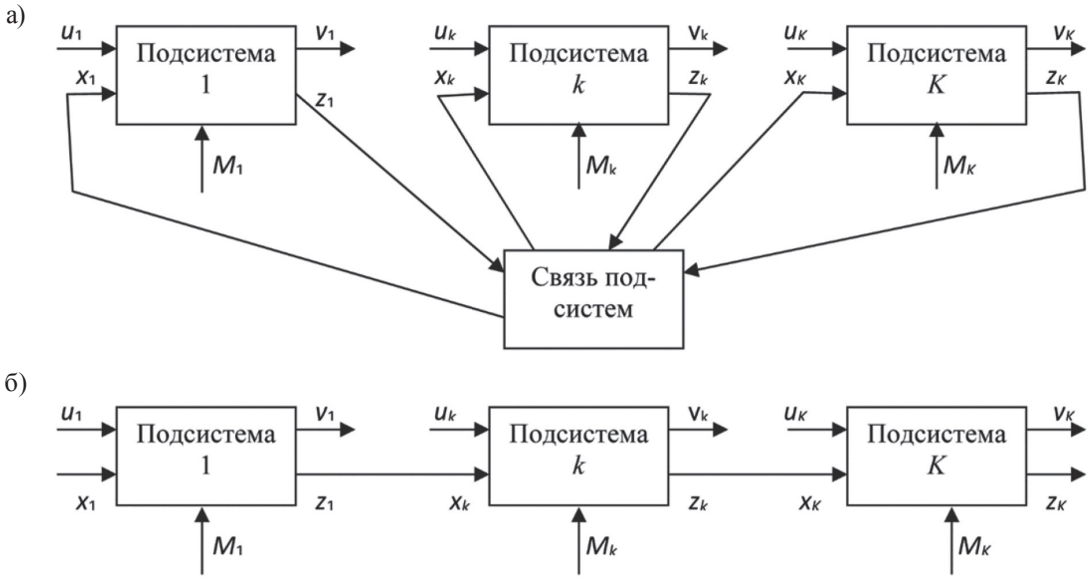


Рис. 6. Структуры системы вычислений: общая (*а*) и с последовательным соединением элементов (*б*)

Более интересным является применение СЛП в случае, когда необходимо согласование целевых функций [13]. Метод послужил, фактически, родоначальником целой группы методов, поэтому рассмотрим его более подробно. Схема такой задачи имеет следующий вид (рис. 7). Имеется один элемент (*Центр*) на верхнем уровне и K ($k = 1, K$) элементов (автономных производств без горизонтальных связей между ними) на нижнем уровне. *Центр* располагает ресурсом в количестве X_0, который необходимо распределить между производствами в количестве x_k в соответствии с их запросами s_k.

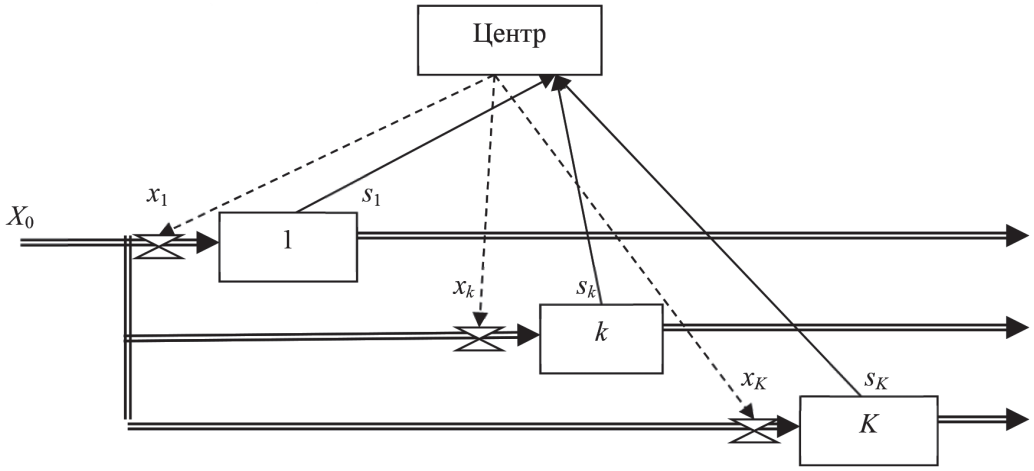


Рис. 7. Система распределения ресурса

Элементы используют ресурсы с эффективностью $r_k f(x_k)$, где r_k — числовой коэффициент эффективности; $f(x_k)$ — функция использования ресурсов. Работа системы идет в условиях неопределенности. *Центр* не знает точной величины r_k ($r_k \neq s_k$) и судит о ней по диапазону изменения r_k и сообщениям s_k элементов. В свою очередь, элементы не знают точной величины X_0 (дефицит или избыток). Необходимо выработать закон взаимодействия *Центра* и элементов, чтобы соблюдалось условие $r_k = s_k$.

Центр руководствуется следующей целевой функцией:

$$\Phi = \sum_{k=1}^{K} f\left(x_k\right)/s_k \to \min$$

при ограничении

$$\sum_{k=1}^{K} x_k \le X_0,$$

k-й элемент использует целевую функцию

$$\varphi_k = f(x_k)/(r_k - \lambda x_k) \to \max,$$

где λ — цена единицы ресурса.

На этапе подготовки данных элементы сообщают *Центру* свои оценки s_k коэффициента эффективности r_k. Условие $s_k \neq r_k$ служит проявлением активности элементов.

На этапе процесса планирования *Центр* решает свою задачу оптимизации, при этом применяя $f(x_k) = (1/2)(x_k)^2$ — разновидность производственной функции. На этапе реализации плана *Центр* оценивает успешность работы элементов.

Возможны различные разновидности принципов работы системы, подробно описанные в [13], из которых рассмотрим два.

1. При использовании принципа жесткой централизации цена λ постоянна (λ = const) в течение всей игры. Тогда

$$x_k = s_k R \Big/ \sum_{j=1}^{K} s_j.$$

Показано, что в выигрыше оказываются элементы, сообщающие неверные сведения об r_k.

2. При применении принципа согласованного управления *Центр* на этапе планирования решает ранее описанную задачу совместно с условием

$$f\left(x_k\right) - \lambda x_k = \max_{0 \le vk \le \infty} \left(\frac{f\left(v_k\right)}{s_k} - \lambda v_k \right),$$

цена λ — переменна и определяется из решения системы выражений:

$$df\left(x_k\right) / dl = l / s_k;$$

$$\sum_{k=1}^{K} x_k \le X_0.$$

В этом случае x_k определяется так же, как и при жесткой централизации, а $\lambda = R \Big/ \sum_{j=1}^{K} s_j$. В рассматриваемом случае элементам выгоднее сообщать правильную информацию. Заметим, что здесь речь идет о согласовании задач уровней только с вертикальными связями (веерная структура). Позднее для указанных целей было предложено использовать игровые алгоритмы в двухуровне-

вой структуре с двумя игроками [13], [14] и двухуровневое булево программирование с приближенным сложным методом решения [15], [16].

Своеобразная двухуровневая система расчета представлена в работе [17]. Сначала с помощью задач статического линейного программирования осуществляется выбор состава оборудования и вырабатывается вариант расписания. Далее расписание уточняется с помощью имитационного моделирования. Сравнительные характеристики методов для двухуровневой структуры приведены в табл. 2. Математическое описание двухуровневой системы послужили базой для целого ряда новых методов.

Таблица 2

Методы исследования двухуровневых иерархических АСУ

Метод	Достоинства	Недостатки
Д1. Частотный [10]	Иерархическая динамическая система	Одинаковые масштабы на уровнях. Только процесс неоптимального управления. Неучет экономических свойств. По одному элементу на уровне
Д2. Частотный [11]	Иерархическая динамическая система. Учет горизонтальных связей	Одинаковые масштабы на уровнях. Только процесс неоптимального управления. Неучет экономических свойств. «Веерная» структура
Д3. Пространство состояний [11]	Иерархическая динамическая система. Учет горизонтальных связей	Одинаковые масштабы на уровнях. Только процесс неоптимального управления. Неучет экономических свойств. «Веерная» структура
Д4. Теоретико-множественная модель [12]	Учет горизонтальных связей	Невозможность получения прикладных результатов
Д5. Процесс планирования [12]	Учет горизонтальных связей. Оптимальность алгоритмов. Учет экономических свойств	Неучет динамических свойств. Одинаковый масштаб на уровнях
Д5. Процесс планирования [13]	Учет горизонтальных связей. Оптимальность алгоритмов. Учет экономических свойств	Неучет динамических свойств. Одинаковый масштаб на уровнях. «Веерная» структура системы
Д6. Процесс планирования [13] – [16]	Оптимальность алгоритмов. Учет экономических свойств	Неучет динамических свойств. Одинаковый масштаб на уровнях. По одному элементу на уровнях
Д7. Хоботов [17]	Использование нелинейного и стохастического программирования	Процесс планирования

В 90-е годы XX в. появилась необходимость описания трехуровневых структур автоматизированных систем. Сравнительные характеристики методов для трехуровневой структуры показаны в табл. 3.

Таблица 3

Методы исследования трехуровневых иерархических АСУ

Метод	Достоинства	Недостатки
Т1. Интегральный метод [22], [23]	Учтены особенности О1 – О5	Неоднородное описание процессов планирования и управления. Затруднения в экономической трактовке квадратичного критерия для динамики. Неучет нелинейностей в описании процесса управления
Т2. Однородный метод [22], [23]	Учтены все особенности О1 – О7	Применение только для неколебательных переходных процессов в системе
Т3. Процесс планирования [18]	Три уровня	Неучет процесса управления. Отсутствие изменения масштабов. Отсутствие горизонтальных связей. По одному элементу на уровне
Т4. Голенко [19]	Предприятие – цех – участок	Процесс планирования
Т5. Динамические игры и оптимальное управление [20], [21]	Оптимальные алгоритмы	По одному элементу на каждом уровне. Неизменный масштаб. Отсутствие оценки экономических свойств. Неучет процесса планирования
Т6. Активные методы [6]	Формализация плановых решений, связанных с «человеческим фактором»	Преимущественно двухуровневые объекты с «веерной» структурой. Слабый учет горизонтальных связей. Неучет процесса планирования

Различные варианты описания трехуровневых систем представлены в работах [18] – [21]. В работе [18] рассматривается процесс планирования в системе с трехуровневой «веерной» структурой. Математический расчет проводится с помощью задачи нелинейного и выпуклого программирования. В публикации [19] рассмотрена трехуровневая структура: *предприятие – цех – участок* для процесса планирования с использованием задач нелинейного и стохастического программирования. Сложные алгоритмы решения стохастических задач сводятся к более простым детерминированным, а нелинейные и выпуклые задачи решаются с помощью эвристических алгоритмов.

Трехуровневая система с «веерной» структурой описана и в работах [6], [20], [21]. В работе [6] освещены специфические методы, названные *механизмами* (рис. 8). В публикации [21] рассмотрена трехуровневая схема: *принципал – супервайзер – исполнитель*. Расчеты выполняются методами оптимального управления и динамических игр. В работе [21] выделено три уровня: *федеральный центр – органы управления – промышленные предприятия.* Рассмотрена управляемая динамическая система с «веерной» структурой. Управляющие воздействия вырабатываются методами принуждения и побуждения. Более детальная характеристика активных методов по предмету управления представлена в табл. 4, а по мотивации управления — в табл. 5.

Особый интерес вызывает совокупность (см. рис. 8) активных методов [6] для двух- и трехуровневой структуры с использованием игровых методов и задачи статического линейного программирования. Для методов введены новые понятия. Под *стимулированием* понимается побуждение центра к совершению определенных действий агентом путем воздействия на его целевую функцию. *Мотивация* — это приведение доводов в пользу чего-либо. Активные методы более подходят для процесса планирования и отличаются итеративным характером решения задачи для одного интервала времени. Для процесса управления их применение проблематично.

Одними из первых работ, учитывающих динамические процессы в системе, являются работы [22], [23], в которых были предложены два метода: интегральный и однородный. Процессы планирования и управления с применением этих методов проиллюстрированы на примере описания диспетчерского уровня ($h = 2$).

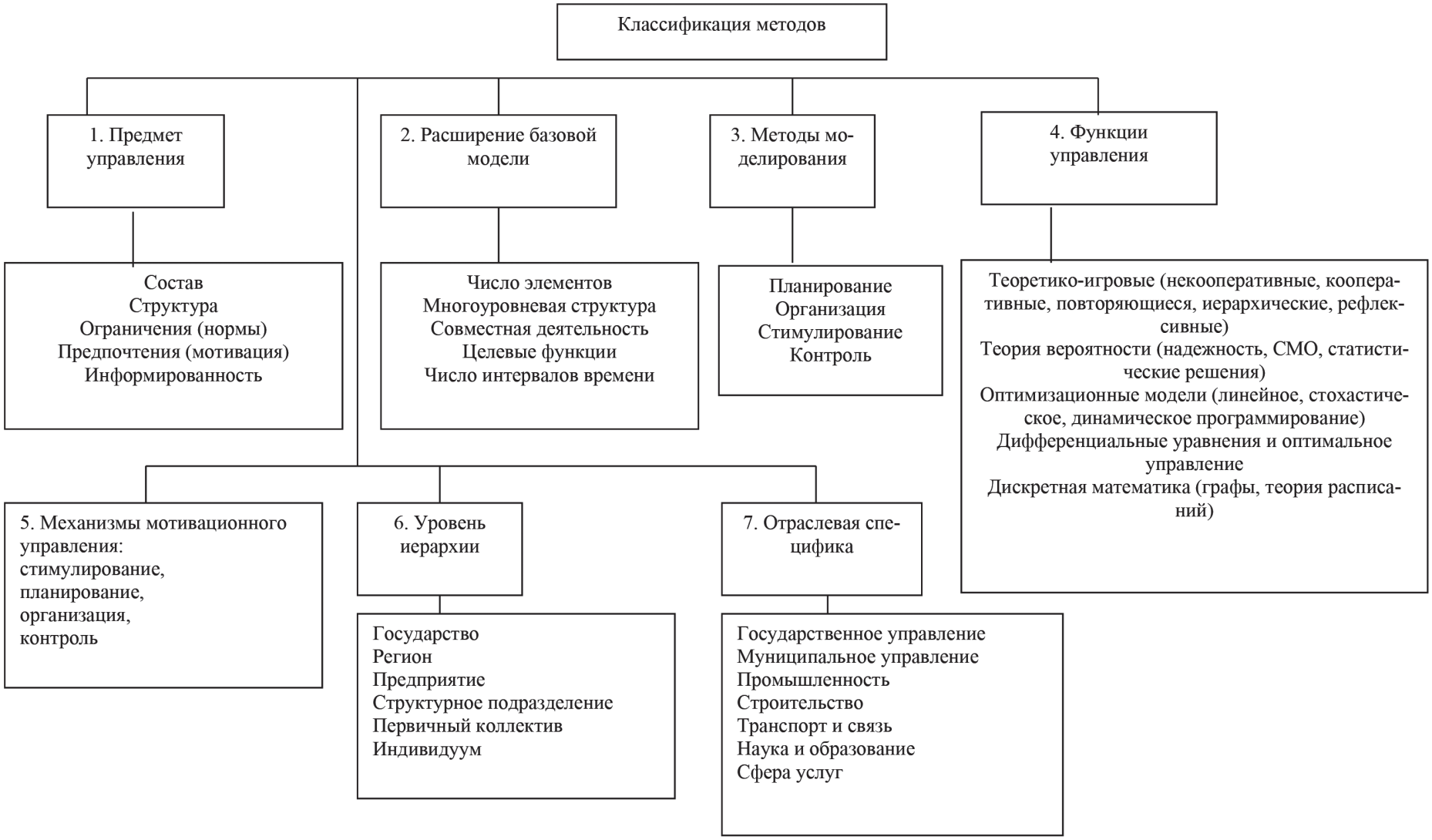


Рис. 8. Классификация механизмов управления

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

Таблица 4

Классификация по предмету управления

Метод (механизм) управления	Предмет управления
Составом	Расчет
Структурой	Иерархия над технологическим графом (при наличии ограничений). Иерархия над технологической цепью (при наличии ограничений, два уровня). Выбор типа структуры (матричная или функциональная). Сетевые структуры (веерная двухуровневая структура)
Институциональное	Управление ограничениями (дополнительные ограничения) Институциональное и мотивационное управление (один агент, остальные позиции — несколько агентов). Институциональное управление в многомерных системах. Управление нормами деятельности. Аккордная оплата труда. Дуопология Курно
Информированное	Производитель и посредник. Коррупция. Формирование команды. Предвыборная борьба. Реклама товара
Мотивационное (см. табл. 5)	Стимулирование. Планирование. Организация. Контроль

Таблица 5

Функции и механизмы мотивационного управления

Функция управления	Метод (механизм)
Стимулирование	Непрерывная модель (игра *Центр – Агент*). Дискретная модель (игра двух лиц: *Центр – Агент*). Базовый (один элемент). Контракты (Ц — природа, вероятности). Индивидуальный результат (одно и многоэлементная игра с индивидуальной информацией). Результаты коллективные (многоэлементная игра с агрегированной информацией). Унифицированный (унифицированные агенты). Бригадная оплата труда (КТУ, КТВ). В матричных структурах управления два уровня управляющей части Ранговый (ранги агентов). Экономическая мотивация (нормативы: ставки агентов и т. д.)
Планирование	Распределение ресурса (информацию сообщает агент). Активная экспертиза (искажение информации). Внутренние цены (известны типы агентов). Конкурс (известны типы агентов). Обмен (известны типы агентов)

Таблица 5
(*Окончание*)

Организация	Смешанное финансирование (из многих источников). Противозатратный (антимонопольный) механизм Затраты — эффект (способы накопления, динамическое. программирование). Самоокупаемость (технологическая цепочка). Страхование (страхование риска). Оптимизация производственного цикла (технологическая цепочка). Назначение агентов на разные операции
Контроль	Комплексное оценивание (иерархия оценок). Согласие (распределение). Многоканальный. Дополнительные соглашения

Результаты

Интегральный метод. Процесс планирования описывается с помощью задачи статического или динамического линейного программирования, а процесс управления — с помощью задачи линейно-квадратичной оптимизации. Используем для планирования задачу динамического линейного программирования. Процесс планирования для отдельного структурного элемента описывается следующим образом:

$$\mathbf{z}_k(t_i) = \mathbf{A}_k\mathbf{z}_k(t_{i-1}) + \mathbf{B}_k\mathbf{p}_{1k}(t_{i-1}),\ \mathbf{z}_k(0) = \mathbf{z}_{k0};$$

$$\mathbf{p}_k(t_i) = \mathbf{F}_k\mathbf{z}_k(t_{i-1});$$

$$\sum_{i=0}^{N-1}\mathbf{D}_1^m\mathbf{p}_{1k}\left(t_i\right) \le \mathbf{b}^m\left(0\right);$$

$$\sum_{i=0}^{N-1}\mathbf{p}_K\left(t_i\right) \le \mathbf{P}\left(T\right);$$

$$\mathbf{D}_k^{\psi}\mathbf{p}_k(t_{i+1}) \le \mathbf{b}_k^{\psi}(t_i);$$

$$\mathbf{D}_k^{m}\mathbf{p}_{1k}(t_{i+1}) \le \mathbf{p}_{k-1}(t_i);$$

$$\mathrm{b}_k^{\psi}(t_i) = \mathrm{b}_k^{\psi}(t_{i-1}) + \Delta\mathrm{b}_k^{\psi}(t_{i-1});$$

$$G_k = -\mathbf{F}_k\mathbf{P}_k(T) \to \min;$$

$$i = 0, N-1, t_i = iv, t_0 = 0, T = Nv,$$

где **z**, **p** — вектор-столбцы (планового) незавершенного производства и ежедневного плана; $\mathbf{p}_1$ — вектор-столбец запуска комплектов ресурсов в производство; **D** — матрица норм расходов ресурсов; **b** — вектор-столбец наличного количества ресурсов; $\mathbf{b}^m$ — вектор количества материальных ресурсов; $\mathbf{b}^{\psi}$ — вектор количества других ресурсов; $\Delta\mathbf{b}$ — поступление ресурсов; **P** — вектор-столбец плана уровня руководителя; **F** — вектор-строка прибыли от выпуска единицы продукции; **A**, **B**, **C** — единичные матрицы соответствующих размерностей; v, T — минимальный интервал времени и время моделирования; m ($m = 1, M$) — виды материальных ресурсов; ψ ($\psi = 1, \Psi$) — виды прочих ресурсов; i ($i = 1, I$) — моменты времени; k ($k = 1, K$) — номер подразделения.

Для процесса управления справедливы следующие выражения:

$$\mathbf{z}_k(t_i) = \mathbf{A}_k\mathbf{z}_k(t_{i-1}) + \mathbf{B}_k\mathbf{u}_k(t_{i-1}),\ \mathbf{z}_k(0) = \mathbf{z}_{k0};$$

$$\mathbf{y}_k(t_i) = \mathbf{C}_k\mathbf{z}_k(t_i);$$

$$\boldsymbol{\varepsilon}_k(t_i) = \mathbf{p}_k(t_i) - \mathbf{y}_k(t_i);$$

$$J_k = \varepsilon_k T(N)\mathbf{C}_{1k}\varepsilon_k(N) + \sum_{i=0}^{N-1}\left\{\varepsilon_k T(t_i)\mathbf{C}_{1k}\varepsilon_k(t_i) + \mathbf{u}_k T(t_i)\mathbf{C}_{2k}\mathbf{u}_k(t_i)\right\} \to \min;$$

$$i = 0, N-1,\ t_i = iv,\ t_0 = 0,\ T = Nv,$$

где **z**, **y** — векторы-столбцы состояния и выхода, **u** — вектор-столбец управления; **p** — вектор-столбец плана; **ε** — вектор столбец отклонений; **D** — матрица норм расходов; **b** — вектор-столбец наличного количества ресурсов; $\mathbf{b}^m(0)$ — вектор количества материальных ресурсов, которыми располагает руководитель; $\Delta\mathbf{b}$ — поступление ресурсов; **Y** — вектор-столбец управления уровня $h = 3$; $\mathbf{C}_1$, $\mathbf{C}_2$ — матрицы потерь от отклонений и затрат на дополнительные ресурсы для управления; **A**, **B**, **C** — матрицы, отражающие динамику процесса управления v, T — минимальный интервал времени и время моделирования; m — виды материальных ресурсов; ψ — виды прочих ресурсов; i — моменты времени k — номер подразделения.

При этом предполагается априори, что соблюдаются условия:

$$\sum_{i=0}^{N-1}\mathbf{D}_1^m\mathbf{u}_{1k}(t_i) \le \mathbf{b}^m(0);$$

$$\mathbf{y}_K(T) \le \mathbf{Y}(T);$$

$$\mathbf{D}_k^{\psi}\mathbf{u}_k(t_i) \le \mathbf{b}_k^{\psi}(t_{i-1}),\ \mathbf{D}_k^{m}\mathbf{u}_k(t_{i+1}) \le \mathbf{y}_{k-1}(t_i);$$

$$\mathbf{b}_k^{\psi}(t_i) = \mathrm{b}_k^{\psi}(t_{i-1}) + \Delta\mathrm{b}_k^{\psi}(t_{i-1}).$$

Для интегрального метода характерны следующие недостатки.

1. Требуется знание двух видов описания.

2. Не учитывается нелинейный вариант описания процесса управления.

3. Имеются трудности трактовки квадратичного критерия процесса планирования с экономических позиций.

Этих недостатков лишен однородный метод.

Однородный метод. Процесс планирования описывается так же, как и в интегральном методе, иначе представлен процесс управления:

$$\mathbf{z}_k(t_i) = \mathbf{A}_k\mathbf{z}_k(t_{i-1}) + \mathbf{B}_k\mathbf{u}_k(t_{i-1}),\ \mathbf{z}_k(0) = \mathbf{z}_{k0};$$

$$\mathbf{y}_k(t_i) = \mathbf{C}_k\mathbf{z}_k(t_i);$$

$$\sum_{i=0}^{N-1}\mathbf{D}_1^m\mathbf{u}_{1k}(t_i) \le \mathbf{b}^m(0);$$

$$\mathbf{y}_K(T) \le \mathbf{Y}(T);$$

$$\mathbf{D}_k^{m}\mathbf{u}_k(t_{i+1}) \le \mathbf{y}_{k-1}(t_i);$$

$$\mathbf{D}_k^{m}\mathbf{u}_k(t_i) \le \mathbf{b}_k^{m}(t_{i-1});$$

$$\mathbf{b}_k^{\psi}(t_i) = \mathrm{b}_k^{\psi}(t_{i-1}) + \Delta\mathrm{b}_k^{\psi}(t_{i-1});$$

$$\boldsymbol{\varepsilon}_k(t_i) = \mathbf{p}_k(t_i) - \mathbf{y}_k(t_i);$$

$$J_k = \sum_{i=0}^{N}\left\{\mathbf{C}_{1k}\varepsilon_k(t_i) + \mathbf{C}_{2k}\mathbf{u}_k(t_i)\right\} \to \min;$$

$$i = 0, N - 1, t_i = iv, t_0 = 0, T = Nv,$$

где **z**, **y** — векторы-столбцы состояния и выхода, **u** — вектор-столбец управления; **p** — вектор-столбец плана; **ε** — вектор столбец отклонений; **D** — матрица норм расходов; **b** — вектор-столбец наличного количества ресурсов; $\mathbf{b}^m(0)$ — вектор количества материальных ресурсов, которыми располагает уровень $h = 3$; $\Delta\mathbf{b}$ — поступление ресурсов; **Y** — вектор-столбец управления уровня $h = 3$; $\mathbf{C}_1$, $\mathbf{C}_2$ — векторы-строки потерь от отклонений и затрат на дополнительные ресурсы для управления; **A**, **B**, **C** — матрицы, отражающие динамику процесса управления v; T — минимальный интервал времени и время моделирования; m — виды материальных ресурсов; ψ — виды прочих ресурсов; i — моменты времени; k — номер подразделения.

Однородный метод имеет и некоторые ограничения. Он напрямую применим только для неколебательных переходных процессов. Если процесс колебательный, то следует в линейном критерии использовать модуль, при этом надо либо усложнять алгоритм решения, либо применять схемное решение на модели системы. Из ранее изложенного видно, что наиболее предпочтительным остается однородный метод.

Обсуждение результатов

Однородный метод в настоящее время имеет определенное предпочтение по сравнению с другими. Он достаточно прост в понимании и компьютерной реализации, является системным прикладным методом описания оптимальных динамических процессов в трехуровневой системе, учитывает возможность оперативного перехода на выпуск новой продукции, позволяет вырабатывать решения и оценивать последствия их реализации,

Заключение

Проведенный анализ показывает, что по мере роста требований к АСУ производством усложнялся математический аппарат их описания:

– от «задач прямого счета», через описание с помощью ограничений, к оптимальным алгоритмам;

– от отдельного решения задач планирования и задач управления к совместным задачам планирования и управления;

– от разнородного описания процессов планирования и управления к их однородному связанному представлению с возможностью описания процедур оперативного перехода на выпуск новой продукции.

Новым требованиям удовлетворяет предложенный автором однородный метод. Его дальнейшее развитие связано в построением компьютерной модели для использования в управлении реальной системой. Он позволяет получать согласованные и скоординированные решения и служить основой для генерации числовых данных, необходимых для процедуры отладки работоспособной модели.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Основы построения АСУ / под ред. В. И. Костюка. — М.: Сов. радио, 1977. — 304 с.

2. *Чертовской В. Д.* Автоматизация оперативного управления основным производством / В. Д. Чертовской. — Минск: Белорус. политех. ин-т, 1982. — 32 с.

3. *Бобко И. М.* Адаптивная АСУ производством / И. М. Бобко, Г. И. Марчук, А. Г. Аганбегян; под ред. Г. И. Марчука. — М.: Статистика, 1981. — 384 с.

4. *Васильев С. Н.* Интеллектуальное управление динамическими системами / С. Н. Васильев. — М.: Физматлит, 2000. — 352 с.

5. *Мизон В. А.* Интеллектуальные методы управления предприятием / В. А. Мизон. — СПб.: Академия управления и экономики, 2008. — 302 с.

6. *Новиков Д. А.* Теория управления организационными системами / Д. А. Новиков. — М.: Физматгиз, 2012. — 344 с.

7. *Артамошин А. Н.* Интеллектуальные организационно технические системы / А. Н. Артамошин, О. И. Близнова [и др.]. — М.: Академия, 2016. — 256 с.

8. *Питеркин С. В.* Точно вовремя для России. Практика применения ERP / С. В. Питеркин, Н. А. Осадов, Д. В. Исаев. — М.: Альпина Паблишер, 2002. — 368 с.

9. *Александров А. Г.* Частотное адаптивное управление по заданной точности / А. Г. Александров, Д. В. Шатов // Проблемы управления. — 2014. — № 5. — С. 7–13.

10. *Гайдук А. Р.* Синтез нелинейных селективно инвариантных систем на основе управляемой формы Жордана / А. Р. Гайдук // Автоматика и телемеханика. — 2013. — № 7. — С. 3–16.

11. *Месарович М.* Теория иерархических систем / М. Месарович, Д. Мако, Я. Такахара; пер. с англ. — М.: Мир, 1973. — 344 с.

12. Системы: декомпозиция, оптимизация и управление / сост. М. Сингх, А. Титли; пер. с англ. — М.: Машиностроение, 1986. — 496 с.

13. *Бурков В. Н.* Основы математической теории активных систем / В. Н. Бурков. — М.: Наука, 1977. — 256 с.

14. *Горелов М. А.* Иерархическая игра с умышленно искажаемой информацией / М. А. Горелов // Автоматика и телемеханика. — 2016. — № 4. — С. 99–113.

15. *Лавлинский С. М.* Двухуровневая модель государственно-частного партнерства / С. М. Лавлинский, А. А. Панин, А. В. Плясунов // Автоматика и телемеханика. — 2015. — № 11. — С. 89–103.

16. *Береснев В. Л.* О задаче конкурентного размещения предприятий со свободным выбором поставщиков / В. Л. Береснев // Автоматика и телемеханика. — 2014. — № 4. — С. 94–105.

17. *Павлов К. С.* Модели выбора и замены оборудования в производственных системах машиностроительных предприятий / К. С. Павлов, Е. Н. Хоботов //Автоматика и телемеханика. — 2015. — № 2. — С. 125–140.

18. *Сагынгалиев К. С.* Согласование планирования в трехуровневой активной системе / К. С. Сагынгалиев // Автоматика и телемеханика. — 1988. — № 3. — С. 80–91.

19. *Голенко-Гинзбург Д.* Управление трехуровневой производственной системой типа «человек-машина» / Д. Голенко-Гинзбург, В. Кац, С. Ситняковский, Э. Л. Ицкович // Автоматика и телемеханика. — 2000. — № 5. — С. 166–184.

20. *Угольницкий Г. А.* Алгоритмы решения дифференциальных моделей иерархических систем управления / Г. А. Угольницкий, А. Б. Усов // Автоматика и телемеханика. — 2016. — № 5. — С. 148–158.

21. *Угольницкий Г. А.* Трехуровневые системы управления эколого-экономическими объектами веерной структуры / Г. А. Угольницкий, А. Б. Усов // Проблемы управления. — 2010. — № 1. — С. 26 32.

22. *Чертовской В. Д.* Интеллектуализация автоматизированного управления производством / В. Д. Чертовской. — СПб.: Изд-во С.-Петерб. ун-та, 2007. — 164 с.

23. *Чертовской В. Д.* Моделирование процессов планирования в интеллектуальной системе управления производством / В. Д. Чертовской // Информационные технологии в управлении (ИТУ-2016): Материалы 9-й конференции по проблемам управления. — СПб.: Изд-во «Концерн» ЦНИИ «Электроприбор», 2016. — С. 536–544.

REFERENCES

1. Kostyuk, V. I., ed. *Osnovy postroeniya ASU. M.: Sov. Radio, 1977.*

2. Chertovskoi, V. D. *Avtomatizatsiya operativnogo upravleniya osnovnym proizvodstvom*. Minsk: Belorus. politekh. in-t, 1982.

3. Bobko, I. M., G. I. Marchuk, and A. G. Aganbegyan. *Adaptivnaya ASU proizvodstvom*. Edited by G. I. Marchuk. M.: Statistika, 1981.

4. Vasil'ev, S. N. *Intellektual'noe upravlenie dinamicheskimi sistemami*. M.: Fizmatlit, 2000.

5. Mizon, V. A. *Intellektual'nye metody upravleniya predpriyatiem*. SPb.: akademiya upravleniya i ekonomiki, 2008.

6. Novikov, D. A. *Teoriya upravleniya organizatsionnymi sistemami*. M.: Izd-vo Fizmatgiz, 2012.

7. Artamoshin, A. N., O. I. Bliznova, et al. *Intellektual'nye organizatsionno tekhnicheskie sistemy.* M.: Akademiya, 2016.

8. Piterkin, S. V., N. A. Osadov, and D. V. Isaev. *Tochno vovremya dlya Rossii. Praktika primeneniya ERP.* M.: Al'pina Pablisher, 2002.

9. Aleksandrov, A. G., and D. V. Shatov. "Chastotnoe adaptivnoe upravlenie po zadannoi tochnosti." *Control sciences* 5 (2014): 7–13.

10. Gaiduk, A. R. "Design of nonlinear selectively invariant systems based on the controllable Jordan form." *Automation and Remote Control* 74.7 (2013): 1061–1071. DOI: 10.1134/S0005117913070011

11. Mesarovich, M., D. Mako, and Ya. Takakhara. *Teoriya ierarkhicheskikh sistem*. M.: Mir, 1973.

12. Singkh, M., and A. Titli. *Sistemy: dekompozitsiya, optimizatsiya i upravlenie*. M.: Mashinostroenie, 1986.

13. Burkov, V. N. *Osnovy matematicheskoi teorii aktivnykh sistem*. M.: Nauka, 1977.

14. Gorelov, M. A. "Hierarchical games with deliberately distorted information." *Automation and Remote Control* 77.4 (2016): 629–639. DOI: 10.1134/S0005117916040081.

15. Lavlinskii, S. M., A. A. Panin, and A. V. Plyasunov. "A bilevel planning model for public—private partnership." *Automation and Remote Control* 76.11 (2015): 1976–1987. DOI: 10.1134/S0005117915110077

16. Bersenev, V. L. "The Competitive Facility Location Problem with Free Vendor Selection." *Automation and Remote Control* 4 (2014): 94–105.

17. Pavlov, K. S., and E. N. Khobotov. "Models for equipment selection and upgrade in manufacturing systems of machine building enterprises." *Automation and Remote Control* 76.2 (2015): 292–303. DOI: 10.1134/S0005117915020083.

18. Sagyngaliev, K. S. "Soglasovanie planirovaniya v trekhurovnevoi aktivnoi sisteme." *Automation and Remote Control* 3 (1988): 80–91.

19. Golenko-Ginsburg, D., E. L. Itskovich, V. Kats, and S. Sitnyakovskii. "Control of a Three-Level Industrial System of the "Man-Machine" Type." *Automation and Remote Control* 5 (2000): 166–184.

20. Ougolnitsky, G. A., and A. B. Usov. "Solution algorithms for differential models of hierarchical control systems." *Automation and Remote Control* 77.5 (2016): 872–880. DOI: 10.1134/S0005117916050106.

21. Ougolnitsky, G. A., and A. B. Usov. "Three-level control systems of the ecology-economic objects of the fan structure." *Control sciences* 1 (2010): 26–32.

22. Chertovskoj, V. D. *Intellektualizacija avtomatizirovannogo upravlenija proizvodstvom*. SPb.: Izd-vo S.-Peterb. un-ta, 2007.

23. Chertovskoi, V. D. "Modelirovanie protsessov planirovaniya v intellektual'noi sisteme upravleniya proizvodstvom." *Informatsionnye tekhnologii v upravlenii (ITU-2016): Materialy 9-i konferentsii po problemam upravleniya*. SPb.: Izdatel'stvo: Kontsern "Tsentral'nyi nauchno-issledovatel'skii institut "Elektropribor", 2016: 536–544.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ	INFORMATION ABOUT THE AUTHOR
Чертовской Владимир Дмитриевич — доктор технических наук, профессор ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова» 198035, Российская Федерация, Санкт-Петербург, ул. Двинская, 5/7 e-mail: *vdchertows@mail.ru*, *kaf_vsi@gumrf.ru*	**Chertovskoy, Vladimir D.** — 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: *vdchertows@mail.ru*, *kaf_vsi@gumrf.ru*

Статья поступила в редакцию 30 апреля 2017 г.
Received: April 30, 2017.

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

DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-4-866-873

METHODS OF DETECTION OF NOISES AND OUTLIERS IN THE DATA STRUCTURE ON THE EXAMPLE OF SHIP HANDLING DURATION AT AN OIL TERMINAL

Yu. Yu. Rudnitckaia

Brno University of Technology, Czech Republic

Pre-processing of input information is essential part of any analysis. Data missing or the presence of extremes can significantly distort the results and lead to an erroneous solution of problems that are not in accordance with the real situation. Despite extensive research, finding and processing data anomalies is still an area of increased interest. For solving these issues, the results of using of statistical-mathematical and intelligent methods will be reflected in the paper.

This paper focuses on the time series, expressed in number of hours of ship handling on an oil terminal. Such insights as noise and outliers in data, and their causes will be considered. Moreover, it will be proposed detection and processing methods for outliers, and the best method will be chosen (based on comparative analysis of confidence intervals)

In practice, common and well-known methods, such as calculations based on mean value (expected value) or quartiles, cause the loss of valuable information, which further significantly affects the correctness of the overall results. The article points to the importance of preliminary estimation of the data structure. In the case of an asymmetric distribution, use calculations based on the median value is more effective. As an alternative for comparing, the result of data mining method (clustering) with its shortcomings and advantages is shown.

It should also be noted that further analysis of data outliers and the identification of existing dependencies between them lead to improvements of a whole process. Such objects should be considered as unique cases and their study can improve service delivery in the seaport.

Keywords: anomaly detection, descriptive statistics, data structure, data processing, outliers, port processes, ship handling, oil terminal.

For citation:
Rudnitckaia, Yuliya Yu. "Methods of detection of noises and outliers in the data structure on the example of ship handling duration at an oil terminal." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova* 9.4 (2017): 866–873. DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-4-866-873.

УДК 656.60.009.02

МЕТОДЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ШУМОВ И ВЫБРОСОВ В СТРУКТУРЕ ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ДАННЫХ НА ПРИМЕРЕ ДЛИТЕЛЬНОСТИ ОБРАБОТКИ СУДОЗАХОДА НА НЕФТЯНОМ ТЕРМИНАЛЕ

Ю. Ю. Рудницкая

Технический университет, г. Брно, Чешская Республика

Важным этапом любого анализа является предварительная обработка входной информации. Отсутствие данных или наличие экстремумов может значительно исказить результаты и привести к ошибочному решению проблем, несоответствующих реальной ситуации. Несмотря на многочисленные исследования, поиск и обработка аномалий в используемых данных до сих пор является областью повышенного интереса. Для решения этой проблемы в статье отражены результаты применения интеллектуальных и статистическо-математических методов.

Объектом для исследования является временной ряд, выраженный в количестве часов обработки судозахода на нефтяном терминале. Рассмотрены такие понятия, как шумы и выбросы в структуре исходных данных, и причины их возникновения. В статье предложены методы обнаружения и способы обработки выбросов, а также выбран оптимальный вариант для работы с данным временным рядом на основе

сравнительного анализа доверительных интервалов, полученных в результате применения рассматриваемых методов.

На практике универсальные и общеизвестные методы, такие как расчеты на основе среднего значения (математическое ожидание для генеральной совокупности) или квартилей, приводят к потере ценной информации, что в дальнейшем отражается на корректности результатов всего анализа. В статье рассмотрена проблема предварительной оценки структуры данных и необходимость использования расчетов на основе значения медианы в случае асимметричности ряда распределения величин. В качестве альтернативы показан результат метода анализа данных (кластеризации), его недостатки и преимущества.

Следует отметить, что определение выбросов в структуре используемых данных принесет большую пользу при их последующем анализе и выявлении существующих закономерностей между ними. Судозаходы, которые представляют собой выбросы, нужно рассматривать как уникальные случаи, удаление которых из общей выборки не приведет к дальнейшему улучшению процесса обработки танкерного флота.

Ключевые слова: временной ряд, анализ выбросов, описательная статистика, нефтяной терминал, портовые процессы, обработка судна.

Для цитирования:
*Рудницкая Ю. Ю.*Методы определения шумов и выбросов в данных на примере длительности обработки судозахода на нефтяном терминале / Ю. Ю. Рудницкая // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2017. — Т. 9. — № 4. — С. 866–873. DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-4-866-873.

Введение

Использование современных алгоритмов, таких областей анализа как Data Mining, Machine learning и Process Mining, открывает ряд новых возможностей для улучшения количественных и качественных показателей портовых процессов. Исследование модели процесса «*как есть*» отслеживания потоков работ в режиме online, определение проблемных мест, перегруженных ресурсов, принятие решений и предсказание поведения системы — вот неполный перечень проблем, решаемых в данных областях [1]. Однако исследования должны базироваться на качественных входных данных. В противном случае ни один из существующих алгоритмов не справится с обработкой или приведет к бессмысленным результатам.

На сегодняшний день в России в портах введены информационные системы, отвечающие, в том числе, за проверку качества вводимых данных. Несмотря на это, ошибок в хранилищах данных не избежать, поэтому необходимо заранее определить рабочую группу анализируемых данных и оценить их возможные выбросы.

На основе визуального и сравнительного анализа определен эффективный метод определения шумов и выбросов в структуре данных. Основные работы, связанные с применением методов анализа данных, чаще всего относятся к области медицины и финансов [2] – [5]. Вопрос использования подобных средств анализа в области морской транспортной логистики, а именно ее составляющей части — обработки судна на терминале — является актуальным и до конца неизученным.

Методы и материалы

1. Временной ряд и аномалии в структуре данных

Объектом дальнейшего анализа выступает временной ряд, т. е. собранные в различные моменты времени значения каких-либо параметров исследуемого процесса. В данном случае параметром служит длительность обработки судозахода на нефтяном терминале. Временной ряд, как правило, состоит из следующих элементов: длительность обработки судна $T = \{t_1, t_2, \dots, t_n\}$ и числовое значение показателя (номер судозахода): $X = X(T) = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$ [6], где n — количество исследуемых судозаходов (в течение рассматриваемого периода зафиксировано 2657 судозаходов). Для того, чтобы визуально отразить качество применяемых далее методов, необходимо построить диаграмму зависимости количества судозаходов от длительности их обработки, выраженную в виде следующей формулы:

$$X(T) = \sum_{i=1}^{n} x_i(t), \quad (1)$$

где $X(T)$ — функция зависимости количества судозаходов от длительности их обработки; $\tau \in [5{,}5;\ 671{,}5]$ — длительность обработки судозахода (за интервал взят промежуток отминимального времени обработки до максимального включительно); x_i — отдельно взятый судозаход.

Таким образом, получаем диаграмму, отражающую количество судозаходов и длительность их обработки, необходимую для дальнейших расчетов (рис. 1 и 2). Для наглядности временные периоды указаны в соответствии с шагом 2,7 %, т. е. 18 ч:

$$\left(t_{\max} - t_{\min}\right) \cdot 0{,}027 = \left(671{,}5 - 5{,}5\right) \cdot 0{,}27 \approx 18 \text{ ч}. \quad (2)$$

Одним из основных факторов, оказывающих значительное влияние на результаты анализа данных, является *зашумленность*. Она может быть вызвана как ошибкой оператора и системы, так и ошибкой переноса данных на электронный носитель, погрешностью вычислений и даже причиной природного характера. В научной литературе определения понятий «шум» (noise) и «выброс» (outlier) различаются в зависимости от источника. Как правило, под шумом понимается ошибка в данных, определяемая как выражение «первоначальное значение ± сигнал». Самым тривиальным методом обработки шума служит удаление объекта, который является шумом, из общей выборки. Более разумные способы предлагают алгоритмы Data Mining, которые хорошо справляются с обработкой шумов — от замены шума на среднее или наиболее часто встречающееся значение до прогнозирования вероятного значения на основе остальных параметров объекта.

В свою очередь, выбросы представляют собой различные аномалии экстремумы в процессе, требующие дополнительного анализа. Изучение подобных выбросов может привести к значительному улучшению показателей эффективности всего процесса и повысить качество предоставляемых услуг. Важно отметить, что иногда объект можно отнести как к выбросу, так и к шуму одновременно. Например, судозаход с временем обработки 670 ч может являться частным случаем (выбросом) или ошибкой в базе данных (шумом). Для определения отклонений во временном ряде и выявления его структуры далее изложены основные математико-статистические методы анализа.

2. Статистические методы определение временных выбросов

Для определения выбросов временного ряда необходимо вычислить доверительный интервал, т. е. предельные значения статистической величины, которая с заданной доверительной вероятностью будет находиться в этом интервале при выборке большего объема. Соответственно все значения, лежащие вне интервала, будут относиться к выбросам. Были выбраны следующие методы определения интервала и их параметры (более подробно каждый метод описан в источниках [7] – [9]:

1. Подсчет математического ожидания(μ = 107,49) и стандартного отклонения (σ = 73,06). Эмпирическое правило при ассиметричном распределении ряда данных — правило Бьенамэ–Чебышева.

2. Использование медианы (Q_2= 90,67) как основы для расчетов, не подверженных влиянию временных экстремумов.

3. Использование перцентилей / квартилей и межквартильного интервала [10]. Вычислим межквартильный интервал по формуле

$$IQR = Q_3 - Q_1 = 141{,}67 - 55{,}67 = 86 \text{ ч}, \quad (3)$$

где IQR — межквартильный интервал; Q_1 — нижний квартиль, который делит ряд так, что имеется 25 % наблюдений, которые меньше его, и 75 % наблюдений, которые больше его; Q_3 — верхний квартиль.

4. Визуальное изучение графических представлений временных рядов. Данный метод используется при построении модели процессов в работе [11] и основан на интуитивном определении структуры данных.

Результаты

Для оценки эффективного метода определения выбросов нанесем на диаграмму временного ряда полученные интервалы. На рис. 1 изображен интервал, соответствующий методу квартилей. Межквартильный интервал *IQR* покрыл 54 % всех объектов, и при расчетах доверительный интервал принимает отрицательные значения, чего быть не должно (подтверждено табличными данными на с. 870).

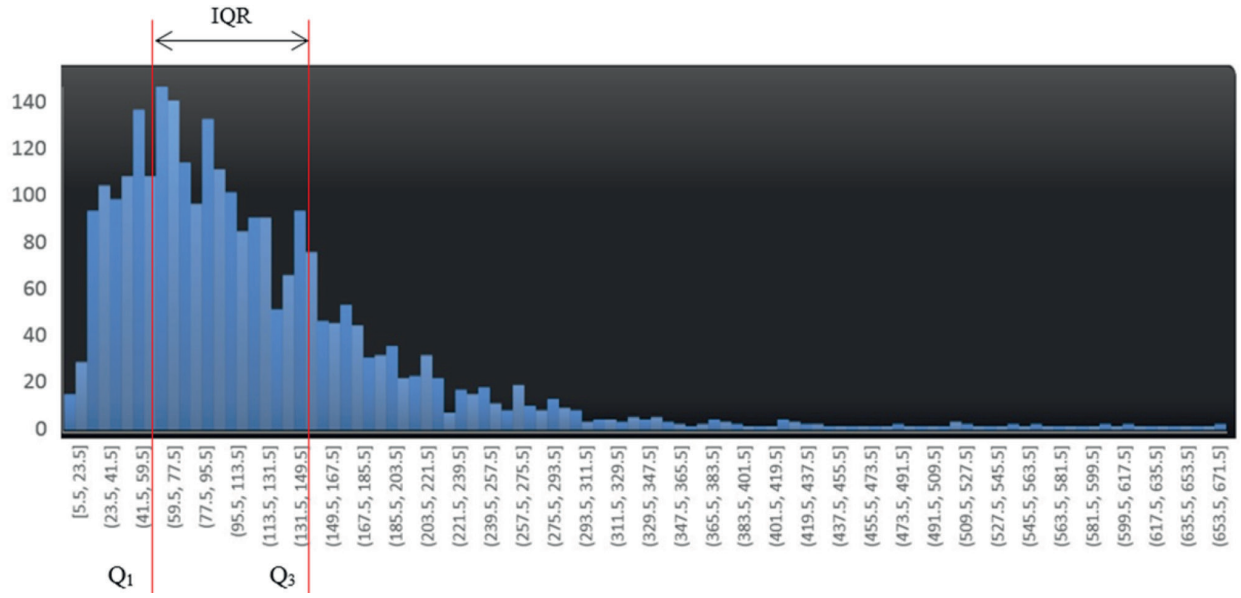


Рис. 1. Использование метода квартилей — межквартильного интервала

Далее, на рис. 2, указаны интервалы, полученные при использовании методов, основанных на математическом ожидании и медиане. Следует отметить, что интервал на основе математического ожидания дает лучшие результаты, чем квартили. Однако объекты, расположенные в области 23,5 ч, выбрасываются. При использовании эмпирического правила Бьенамэ–Чебышева [0], а именно двойного стандартного отклонения, значения снова дают отрицательный результат. Таким образом, наиболее эффективный и оптимальный метод определения выбросов показывает расчет на основе медианы.

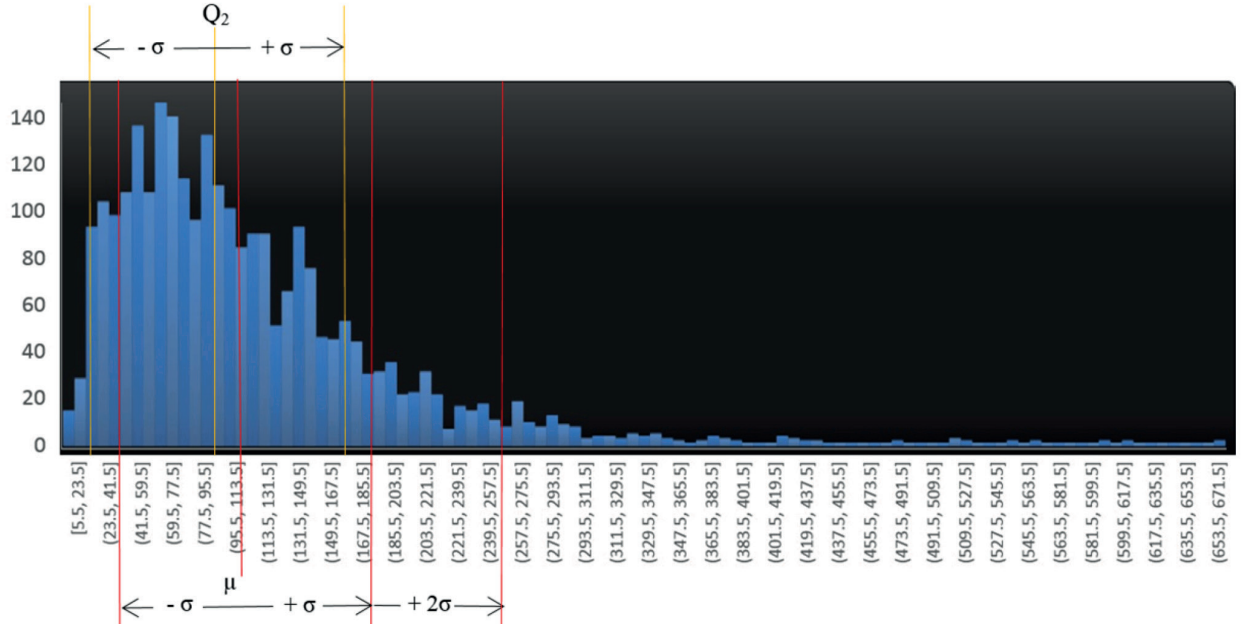


Рис. 2. Метод расчета доверительного интервала на основе медианы и математического ожидания

На основе выполненных расчетов была составлена сравнительная таблица, отражающая методы и их доверительные интервалы.

Сравнительная характеристика методов построения доверительного интервала

Метод построения интервала	Охват судозаходов, %	Доверительный интервал, ч
$\{Q_1 - 1{,}5IQR;\ Q_3 + 1{,}5IQR\}$	93	[–73,33; 270,67]
$\mu \pm \sigma$	77	[34,43; 180,55]
$\mu \pm 2\sigma$	95	[–38,63; 253,61]
$Q_2 \pm \sigma$	84	[17,61; 163,73]
Визуальное изучение диаграммы	92	[18; 216]

Обсуждения

Все статистические методы неспособны точно определить существующие выбросы в данных. Расчеты в большинстве случаев ведутся на основе математического ожидания, и выбросы могут повлиять на общий результат. Несмотря на то, что такие суммарные количественные характеристики, как первый, третий квартили и межквартильный размах не подвержены влиянию выбросов, их показатели также нельзя считать оптимальными в рассматриваемом примере. Теоретически основное количество наблюдений лежит в интервале плюс-минус (±) одно стандартное отклонение от среднего значения [7]. Однако на практике для асимметрично расположенных данных лучше использовать вместо среднего значения значение медианы (в источнике [12] также описываются преимущества использования медианы по сравнению со средним значением).

Использования ошибочных методов можно избежать, оценив изначально структуру данных или применив различные техники анализа данных. Для этого перед началом анализа можно провести проверку нормальности распределения ряда данных. С другой стороны, можно применить алгоритм для разбиения объекта по группам (кластеризация) и тем самым получить объекты с аномальным поведением. Эти варианты способствуют сокращению ошибочных результатов при использовании статистических методов. Их применение описано далее.

1. Проверка нормальности распределения временного ряда

Одно из требований классической регрессионной модели заключается в нормальности распределения случайной величины. Оно позволяет использовать стандартные процедуры и методы статистического анализа, поэтому проверка исследуемых переменных на нормальность распределения является важной составляющей частью анализа данных. Из приведенной таблицы видно, что некоторые доверительные интервалы попадают в область с отрицательными значениями, что для временного параметра является недопустимым. Следовательно, метод не может быть использован для анализа данных, поскольку дает некорректные результаты. Таким образом, необходимо искать другие робастные методы, для которых условие нормальности распределения данных некритично (например, линейная регрессия, метод главных компонент и т. д.).

Рис. 2 также демонстрирует, что медиана Q_2 принимает меньшее значение, чем математическое ожидание. Соответственно временный ряд имеет правую или положительную асимметрию, и использование медианы определяет вполне разумный временной интервал для проведения дальнейших исследований. Для того чтобы определить, возможно ли приведение ряда к нормальному распределению, следует прибегнуть к тесту Харки–Бера. В данном тесте проверяется нулевая гипотеза H_0: $S = 0$, $K = 3$ против гипотезы H_1: $S \neq 0$, $K \neq 3$, где S (Skewness) — коэффициент асимметрии; K (Kurtosis) — коэффициент эксцесса [13]. Чтобы вычислить основные показатели, был выбран язык программирования Python и его библиотеки для анализа данных. В результате получаются следующие показатели статистики: $S = 1{,}829$; $K = 9{,}161$; p-value = 0,000. При достаточно большом значении статистики p-value будет мало́, и тогда будет основание отвергнуть нулевую гипотезу. Статистики часто используют предельный порог для p-value $\geq 0{,}05$. Значения показате-

лей свидетельствуют о том, что временной ряд не имеет нормального распределения и, соответственно, однородности. Таким образом, предварительная проверка нормальности распределения временного ряда способна сократить время, затраченное на методы, которые приведут к ошибочным результатам.

2. Кластеризация

Все указанные ранее методы определения выбросов обладают существенным недостатком, состоящим в том, что будучи универсальными и обобщенными, они не учитывают специфику данных. Таким образом, шум и нетипичное поведение системы могут оказаться особым случаем, который также необходимо рассмотреть. Более приемлемой методикой в данном случае обработки судазахода на нефтяном терминале может быть *кластеризация*, т. е. разделение генеральной совокупности данных на группы / кластеры с последующим их анализом.

Задача кластеризации схожа с задачей классификации — группировкой объектов в кластеры / классы. Однако данный метод не учитывает особенности классической регрессионной модели, и число кластеров выбирается самим пользователем. В рассматриваемом случае кластеризация может быть использована для того, чтобы выделить нетипичные объекты, т. е. выявить отклонения в данных и в дальнейшем работать с ними. Для разбиения данных на кластеры используется программное средство RapidMiner (www.rapidminer.com) и алгоритм, определяющий расстояние между объектами.

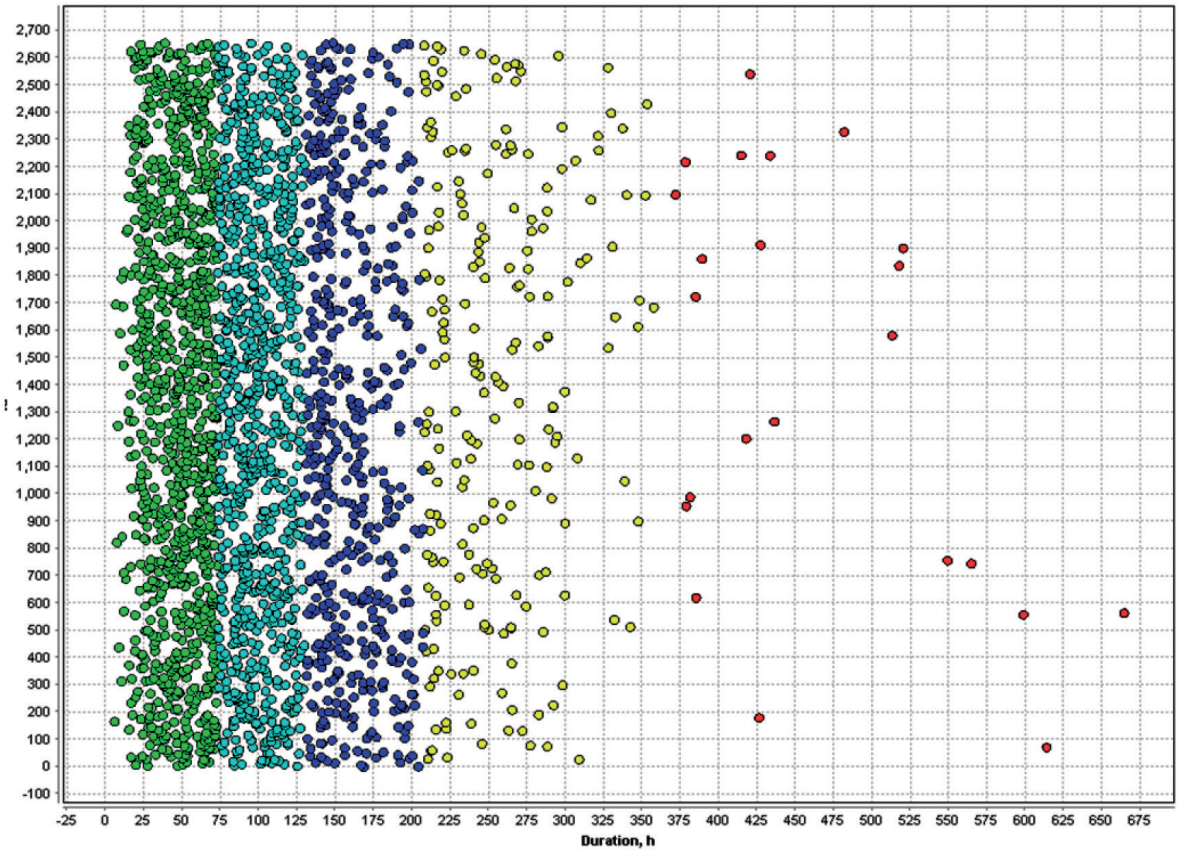


Рис. 3. Кластеризация объектов на пять кластеров

Как видно из рис. 3, судозаходы с длительной обработкой выделены в отдельный кластер и явно относятся к выбросам. Однако группа объектов с малым количеством времени обработки не была выделена. Соответственно при большом разбросе значений объектов применение кластеризации имеет смысл. Тем не менее, если значения расположены близко друг другу, то они не будут выделяться в отдельный кластер, как это произошло в данном случае (группа судозаходов с длительностью обработки в промежутке [5,5; 23,5]).

Заключение

На практике большинство аналитиков используют математическое ожидание для построения доверительного интервала. В машинном обучении также часто используется межквартильный интервал [9], не зависящий от существенного разброса значений анализируемого объекта. Тем не менее, ранее приведенный анализ показывает, что необходимо прежде всего ознакомиться со структурой данных и только уже затем применять известные статистические методы. Следует отметить, что при асимметричности ряда распределения величины расчеты, основанные на математическом ожидании и квартилях, приводят к потере важных данных. Кластеризация четко определяет экстремумы, точнее только судозаходы с длительной обработкой. Судозаходы, обработанные в течение короткого периода времени, не выделяются в отдельную группу. Таким образом, наиболее эффективной методикой при работе с ассиметричным распределением следует признать расчет доверительного интервала на основе медианы и стандартного отклонения.

Предварительная оценка структуры данных также играет большую роль в определении методов дальнейшего анализа, как, например, прогнозирование значения величины. Методы, используемые для нормального распределения, могут приводить к некорректным результатам при анализе асимметричного распределения.

Шумы и выбросы, определенные в данной работе, требуют, в свою очередь, дополнительного анализа. В дальнейшем можно изучить, какими именно признаками и свойствами объекта было вызвано подобное отклонение. Происхождение этих явлений не всегда вызвано ошибкой входных данных и, в свою очередь, может указывать на уникальность случаев. Изучение подобных объектов может повлиять на изменения в сфере оказания услуг в порту, сократить число объектов с аномальным поведением, а также улучшить в целом показатели процесса обработки судна на терминале.

Благодарности

Статья была написана при поддержке Министерства образования, молодежи и спорта Чешской Республики, Национальной программы NPU II; проект передовых технологий в области науки IT4Innovations-LQ1602.

СПИСОКЛИТЕРАТУРЫ

1. *Van der Aalst W.* Process mining: Overview and opportunities / W. Van der Aalst// ACM Transactions on Management Information Systems (TMIS). — 2012. — Vol. 3. — Is. 2. — Pp. 7. DOI:10.1145/2229156.2229157.

2. *Гржибовский А. М.* Типы данных, проверка распределения и описательная статистика / А. М. Гржибовский // Экология человека. — 2008. — № 1. — С. 52–60.

3. *Субботина А. В.* Описательная статистика и проверка нормальности распределения количественных данных / А. В. Субботина, А. М. Гржибовский // Экология человека. — 2014. — № 2. — С. 51–57.

4. *Кузовлев В. И.* Метод выявления аномалий в исходных данных при построении прогнозной модели решающего дерева в системах поддержки принятия решений / В. И. Кузовлев, А. О. Орлов // Наука и образование: науч. изд. МГТУ им. Н. Э. Баумана. — 2012. — № 9. — С. 16. DOI: 10.7463/0912.0483269.

5. *Chandolla V.* Anomalydetection: Asurvey / V. Chandolla, A. Banerjee, V. Kumar // ACM computingsurveys (CSUR). — 2009. — Vol. 41. — Is. 3. — Pp.15. DOI: 10.1145/1541880.1541882.

6. *Box G. E. P.*Time series analysis: forecasting and control /G. E. P. Box, G. M. Jenkins, G. C. Reinsel, G. M. Ljung. — 5th edition. — John Wiley &Sons, 2015. — 712 p.

7. *Левин Д. М.* Статистика для менеджеров с использованием MicrosoftExcel / Д. М. Левин, Д. Стефан, Т. С. Кребиль, М. Л. Беренсон. — 4-е изд. — Пер. с англ. — М.: Вильямс, 2004. — 1312 с.

8. *Калинина В. Н.* Математическая статистика / В. Н. Калинина, В. Ф. Панкин. — М.: Высш. шк., 2002. — 336 с.

9. *Елисеева И. И.* Эконометрика / И. И. Елисеева. — М.: Изд-во «Юрайт», 2014. — 344 с.

10. *Mukherjee S.* Data Structures Using C: 1000 Problems and Solutions / S. Mukherjee. — McGrawHillEducation, 2007. — 556 p.

11. *Рудницкая Ю. Ю.* Исследование дескриптивной модели процесса обработки судна на нефтяном терминале на основе записей из таймшитов / Ю. Ю. Рудницкая // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Морская техника и технология. — 2017. — № 1. — С. 7–15.

12. *Дроботько Д. В.* Неавтономное обнаружение выбросов и очистка сигналов мониторинга внутричерепного давления /Д. В. Дроботько, А. И. Шевченко, В. Ф. Дроботько, И. В. Качур // Искусственный интеллект. — 2013. — № 3 (61). — С. 495–506.

13. *Damodar N. G.* Basic Econometrics / N. G. Damodar. — The McGraw-Hill Companies, 2004. — 1002 p.

REFERENCES

1. Van Der Aalst, Wil. “Process mining: Overview and opportunities.” *ACM Transactions on Management Information Systems (TMIS)* 3.2 (2012): 7. DOI:10.1145/2229156.2229157.

2. Grjibovski, A. M. “Data types, control of distribution and descriptive statistics.” *Human Ecology* 1 (2008): 52–60.

3. Subbotina, A. V., and A. M. Grjibovski. “Descriptive statistics and normality testing for quantitative data.” *Human Ecology* 2 (2014): 51–57.

4. Kuzovlev, V. I., and A. O. Orlov. “Method of detecting anomalies in the source data at constructing a prognostic model of a decision tree in decision support systems.” *Science and Education of Bauman MSTU* 9 (2012): 16. DOI: 10.7463/0912.0483269.

5. Chandola, Varun, Arindam Banerjee, and Vipin Kumar. “Anomaly detection: A survey.” *ACM computing surveys (CSUR)* 41.3 (2009): 15. DOI: 10.1145/1541880.1541882.

6. Box, George E. P., Gwilym M. Jenkins, Gregory C. Reinsel, and Greta M. Ljung. *Time series analysis: forecasting and control.* 5th edition. John Wiley &Sons, 2015.

7. Levin, D. M., D. Stefan, T. S. Krebil’, and M. L. Berenson. *Statistika dlya menedzherov s ispol’zovaniem Microsoft Excel*. 4-e izd. M.: Vil’yams, 2004.

8. Kalinina, V. H., and V. F. Pankin. *Matematicheskaya statistika*. M.: Vyssh. shk., 2002.

9. Eliseeva, I. I. *Ekonometrika*. M.: Izdatel’stvo Yurait, 2014.

10. Mukherjee S. *Data Structures Using C: 1000 Problems and Solutions.* McGrawHillEducation, 2007.

11. Rudnitckaia, Julia Jurjevna. “Study of descriptive process model of ship handling at an oil terminal based on timesheets.” *Vestnik of Astrakhan State Technical University. Series: Marine Engineering and Technologies* 1 (2017): 7–15.

12. Drobotko, D. V., A. I. Shevchenko, V. F. Drobotko, and I. V. Kachur. “Online outliers detection and cleaning of intracranial pressure monitoring signals.” *Iskusstvennyi intellekt* 3(61) (2013): 495–506.

13. Damodar, N. G. *Basic Econometrics*. The McGraw-Hill Companies, 2004.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Рудницкая Юлия Юрьевна —
инженер, аспирант
Технический университет г. Брно
60190, Чешская Республика, Брно,
ул. Антонинска, 548/1
e-mail: *irudnickaia@fit.vutbr.cz*

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Rudnitckaia, Yuliya Yu. —
Engineer, postgraduate
Brno University of Technology
548/1 Antonínská, Brno, 601 90,
Czech Republic
e-mail: *irudnickaia@fit.vutbr.cz*

Статья поступила в редакцию 24 апреля 2017 г.
Received: April 24, 2017.

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

DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-4-874-883

OPTIMIZATION OF INFORMATION SUPPORT OF EDUCATIONAL PROCESS

L. N. Tyndykar, D. S. Vasilchenko

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

The modern world is characterized by high rates of development and introduction at information technologies, which affect various spheres of both scientific and practical activities. Particularly, they become an integral part of educational process of a higher educational institution, giving qualitatively new opportunities of his improvement and maintenance. Actual is a problem at development of the new methods organization on information support. Article is devoted to a research organization and optimization methods in information support of educational process at marine educational institution. Questions of the organization of expeditious information exchange between divisions to graduates data and documents printing division are considered. Research objective is search of the most optimum technique of the organization of information support. The information streams method organization between automated information system «BRS», including in the structure means for automation of intermediate and final assessment, and the automated information system «Diploma», including means for automation of the press process and the accounting of forms at the state sample, but have no data transmission mechanism among themselves. The key task is the information flows organization for support of operation at department, support department of educational process and bureau of certification. As a method of the information support organization drawing up the optimum schedule for data exchange is considered. The developed algorithm based on Jackson and Smith's theorems.

Keywords: educational process, information, information support, automated information system, print queue creation, scheduling theory, Jackson's theorem, Smith's theorem, information flow, certification.

For citation:
Tyndykar, Ljubov N., and Dmitrii S. Vasilchenko. "Optimization of information support of educational process." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova* 9.4 (2017): 874–883. DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-4-874-883.

УДК 65.012.45:004.02 (378.1)

ОПТИМИЗАЦИЯ ИНФОРМАЦИОННОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОГО ПРОЦЕССА

Л. Н. Тындыкарь, Д. С. Васильченко

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

Статья посвящена исследованию методов организации и оптимизации информационного обеспечения образовательного процесса морского учебного заведения. Рассматриваются вопросы организации оперативного информационного обмена между подразделениями, в которых вносятся данные об успеваемости выпускников, и подразделением, в котором осуществляется печать документов об образовании. Целью исследования является поиск наиболее оптимальной методики организации информационного обеспечения. Предлагается рассмотреть организацию информационных потоков между автоматизированной информационной системой, включающей в свой состав средства для автоматизации промежуточной и итоговой аттестации, и автоматизированной информационной системой «Диплом», включающей средства для автоматизации процесса печати и учета бланков государственного образца, предназначенных для выпуска документов об образовании, но не имеющих механизма передачи данных между собой. Представлены и описаны схемы взаимодействия информационных потоков. Описан и предложен к использованию механизм, способствующий исключению ошибок, причиной которых

является человеческий фактор; приведены результаты тестирования этого механизма. Ключевой решаемой задачей является организация информационных потоков для обеспечения работы таких подразделений, как кафедра, отдел обеспечения учебного процесса и бюро дипломирования. В качестве метода организации информационного обеспечения между указанными подразделениями рассматриваются составление расписания для обмена данными, а также ряд методов решения задачи построения расписания, приводится их кратное описание и формулируются выводы о целесообразности их использования для организации информационного обеспечения образовательного процесса. В качестве теоретической базы для представленного исследования выбрана задача одного станка. Приводится подробное описание разработанного алгоритма составления расписания обработки информационных потоков, который реализован на основе теорем Джексона и Смита. Приводятся рекомендации по применению критериев оптимальности и эффективности предлагаемого решения, а также оцениваются результаты его внедрения и функционирования.

Ключевые слова: образовательный процесс, информация, информационное обеспечение, автоматизированная информационная система, построение очереди печати, теория расписаний, теорема Джексона, теорема Смита, информационный поток, дипломирование.

Для цитирования:
Тындыкарь Л. Н. Оптимизация информационного обеспечения образовательного процесса / Л. Н. Тындыкарь, Д. С. Васильченко // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2017. — Т. 9. — № 4. — С. 874–883. DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-4-874-883.

Введение

Современный мир характеризуется высокими темпами развития и внедрения информационных технологий, которые затрагивают различные сферы как научной, так и практической деятельности. В частности, они становятся неотъемлемой частью образовательного процесса высшего учебного заведения, предоставляя качественно новые возможности его совершенствования и сопровождения.

Широкое применение современных средств вычислительной техники и всеобщее внедрение методов оптимизации значительно изменили требования к информационному обеспечению в образовательной деятельности морского учебного заведения. Исследование существующих работ [1] – [3], посвященных применению информационных технологий в образовательном процессе, показало, что вопрос организации движения информационных потоков в них не изучен. Кроме того, отсутствуют работы, посвященные алгоритмам формирования информационного обеспечения, которые крайне важны и необходимы в процессе организации образовательного процесса согласно требованиям Конвенции ПДМНВ-78. Задача развития новых методов организации потоков информации является актуальной [4] – [7], о чем отмечается в работе [8], в которой рассмотрены функциональные схемы организации образовательного процесса и алгоритм передачи данных на основе *метода анализа иерархий*.

Автоматизация промежуточной и итоговой аттестации, а также средства сопровождения процесса печати и учета бланков государственного образца обеспечиваются подсистемами «БРС» [9] и «Диплом» [10]. Движение информационных потоков производится на основе модели, построенной с учетом показателей, позволяющих определить те направления, которым учебное заведение должно уделить особое внимание [11], а также на основе метода организации информационного обеспечения, рассмотренного в работе [12]. Настоящая работа является продолжением исследования, целью которого служит поиск и разработка оптимальной методики организации информационного обеспечения, и в качестве теоретической базы здесь выступают *методы теории расписаний*. Ключевой решаемой задачей является организация информационных потоков (рис. 1) для обеспечения работы таких подразделений, как кафедра, отдел обеспечения учебного процесса и бюро дипломирования.

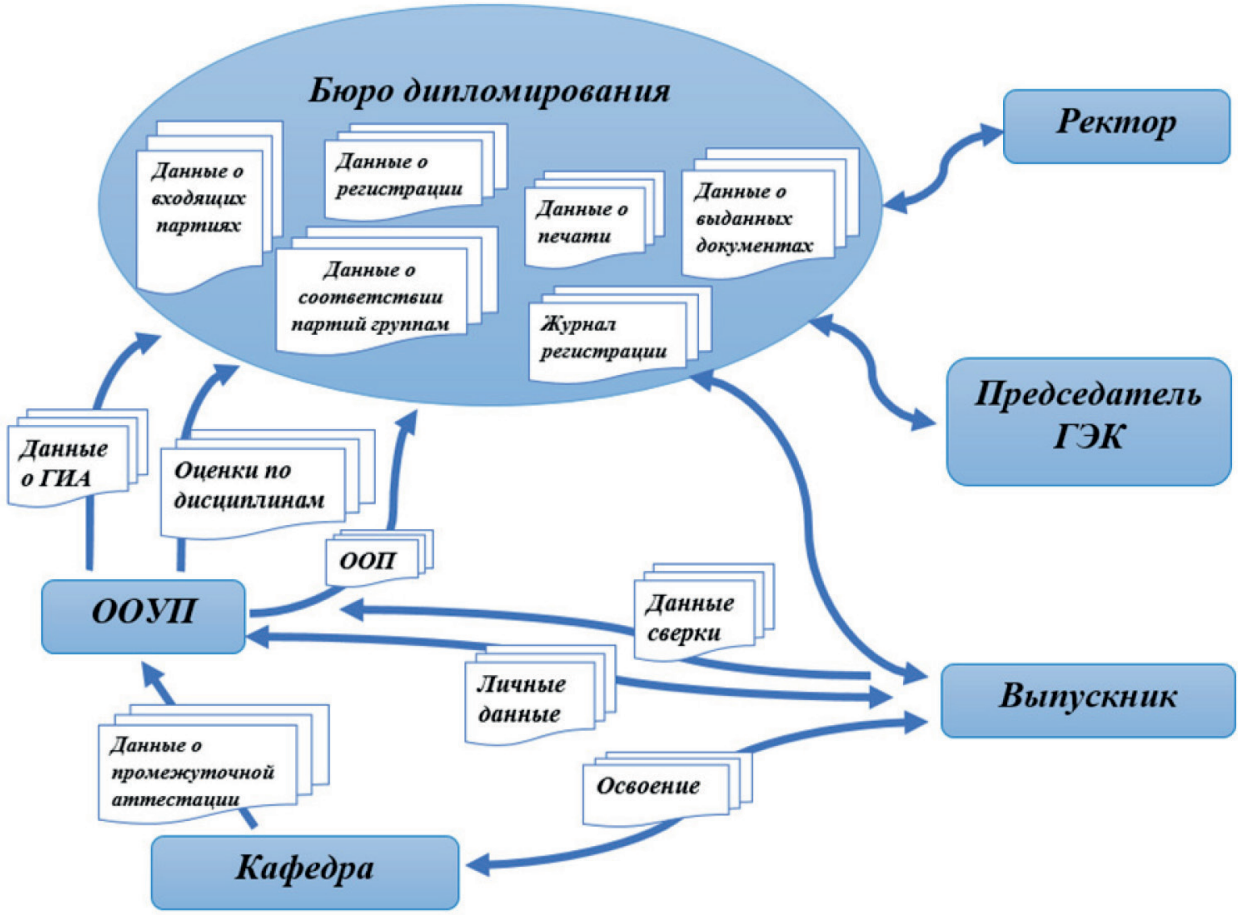


Рис. 1. Схема информационных потоков

Методы и материалы

Для построения очереди в теории расписаний используется *метод ветвей и границ* (branch and bound) [13] – [15] — общий алгоритмический метод для нахождения оптимальных решений различных задач оптимизации, особенно дискретной и комбинаторной оптимизации. По существу, метод является вариацией полного перебора с отсевом подмножеств допустимых решений, заведомо не содержащих оптимальных решений. Допустимым расписанием будет то, при котором соблюдены временные рамки. Оптимальным расписанием станет то, при котором работа будет выполнена в минимальные сроки.

В настоящее время для решения задачи построения расписания применяются нейронные сети. Важнейшим недостатком применения этого подхода является сложность выбора начального состояния нейронной сети. В последние годы особое распространение получили исследования *методов эволюционного поиска*, применение которых приводит к получению хороших результатов. Так, для решения задач оптимизации, в том числе многокритериальной оптимизации [16], основанной на поиске решения, одновременно оптимизирующего более чем одну функцию, находится некоторый компромисс, в роли которого выступает решение, оптимальное в смысле Парето. Для задач моделирования может быть использован генетический алгоритм, действующий путем случайного подбора, комбинирования и вариации искомых параметров с использованием механизмов, напоминающих биологическую эволюцию. Он является разновидностью эволюционных вычислений, основанных на аналогии с такими методами естественной эволюции, как наследование, мутации, отбор и скрещивание.

В работах [17] – [18] описан параллельный генетический алгоритм составления плана-графика и произведена верификация предложенного алгоритма. Однако при использовании подобных

методов имеют место высокая вычислительная трудоемкость и относительная неэффективность на заключительных этапах эволюции [19]. В *теории расписаний* существует ряд задач, которые, имея большое практическое значение, в то же время относительно просто решаются. К ним относятся *задачи одного станка*.

Постановка задачи. Конечный поток заданий печати, поступающих на обслуживание в определенные моменты времени, обслуживается одним прибором, в качестве которого выступает принтер формата А3. В каждый момент времени прибор может осуществить печать только одного приложения. Известно время, необходимое для печати одного приложения. Порядок выполнения печати может быть произвольным, однако должны быть соблюдены установленные требования и достигнута цель, состоящая в выполнении директивных сроков.

Алгоритм составления расписания обработки информационных потоков. Итак, пусть необходимо обслужить множество $N = \{1, 2, \ldots, n\}$ заданий печати. Задание k $(k = \overline{1, n})$ поступает на обслуживание в момент времени $d_k \geq 0$, требуя для обслуживания $t_k > 0$ единиц времени. В качестве критерия эффективности будет выступать минимизация суммарного взвешенного запаздывания (1), минимизация продолжительности выполнения комплекса работ (2) и минимизация максимального запаздывания работ относительно директивных сроков.

Суммарное взвешенное запаздывание выражает суммарные потери, связанные с запаздыванием окончания отдельных работ по отношению к указанным директивным срокам. При этом учитывается, что потери зависят от величины запаздывания, и при одинаковом запаздывании могут быть различны для разного рода работ:

$$F = \sum_{i=1}^{n} b_i z_i \to \min, \tag{1}$$

где $z_i = \max\{0, t_i^{\text{ок}} - D_i\}$ — запаздывание окончания работы по отношению к директивному сроку; $t_i^{\text{ок}}$ — момент окончания i-й работы; D_i — указанный срок; b_i — весовой коэффициент, присвоенный работе; n — число работ.

Минимизация продолжительности выполнения комплекса работ выполняется по следующей формуле:

$$F = t_k \to \min, \tag{2}$$

где t_k — продолжительность выполнения комплекса работ.

Необходимо отметить, что минимизация суммарного времени запаздывания будет являться критерием, непосредственно направленным на достижение указанной цели (выполнения директивных сроков), а минимизация продолжительности выполнения комплекса работ способствует достижению указанной цели косвенно.

Минимизацию максимального запаздывания работ относительно директивных сроков предлагается проводить, опираясь на теорему Джексона [20].

Теорема 1. Минимизация максимального запаздывания в задаче одного станка достигается при упорядочивании этих работ по неубыванию директивных сроков окончания.

Необходимо отметить, что утверждение теоремы 1 существует исключительно в качестве критерия выполнимости любых заданных директивных сроков.

Минимизация суммарного времени прохождения работ при условии выполнения директивных сроков производится в соответствии со следующей целевой функцией:

$$F = \sum\nolimits_{i=1}^{n} t_t^{\text{ок}} \to \min, \tag{3}$$

где $t_t^{\text{ок}} \leq D_i \left(i = \overline{1, n}\right)$.

Алгоритм решения базируется на теореме Смита [21] — рис. 2.

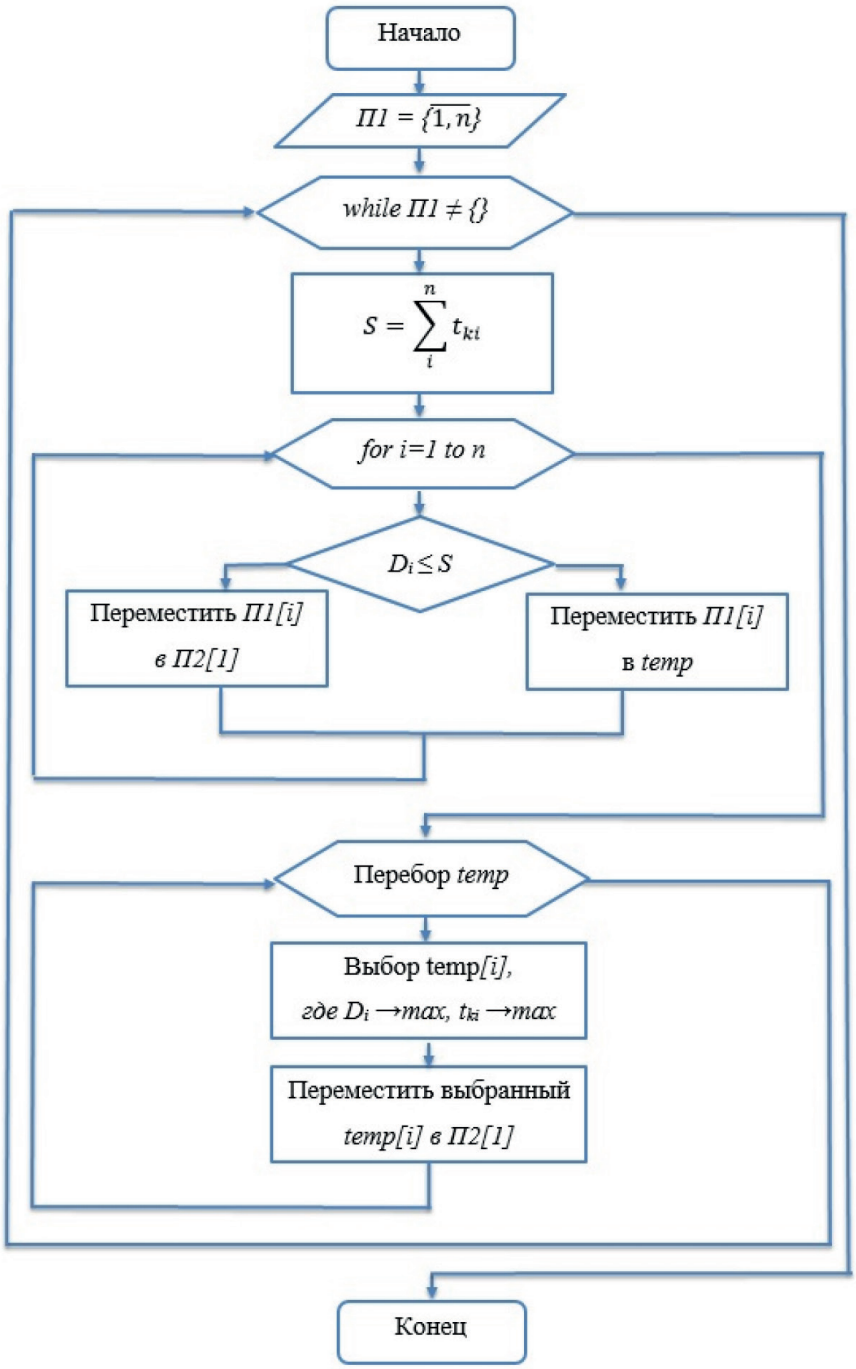


Рис. 2. Алгоритм построения очереди, базирующийся на теореме Смита

Теорема 2. Работа должна быть выполнена последней, если это не приводит к ее запаздыванию, и ее длительность максимальна среди работ, выполнение которых в последнюю очередь не приводит к их запаздыванию.

Пусть П1 — список работ, еще не включенных в расписание; П2 — последовательность работ, включенных в расписание, формируемое в процессе выполнения алгоритма.

1. Если список работ П1 включает больше одной работы, то необходимо выделить работы, для которых директивный срок меньше или равен сумме продолжительности работ этого списка, в противном случае необходимо перейти к пп. 3.

2. Среди выделенных в пп. 1 работ следует выбрать работу с максимальной длительностью, исключить ее из П1 и поместив на первое место в П2, перейти к пп. 1.

3. Поместить единственную работу П1 на первое место в П2. Принять П2 в качестве искомого расписания.

Используя в качестве примера данные табл. 1, необходимо проследить последовательность преобразований списков работ П1 и П2 (табл. 2).

Таблица 1

Исходные данные

Исходные данные	Номер задания					
	$i = 1$	$i = 2$	$i = 3$	i = 4	$i = 5$	$i = 6$
t_k	4	7	3	1	2	5
D_i	22	21	8	12	10	22

Таблица 2

Преобразование списков П1 и П2

Алгоритм выполнения	Списки работ	
	П1	П2
Шаг 1	{3, 5, 4, 1}	{2, 6}
Шаг 2	{3, 5, 4}	{1, 2, 6}
Шаг 3	{5, 4}	{3, 1, 2, 6}
Шаг 4	{4}	{5, 3, 1, 2, 6}
Шаг 5	{}	{4, 5, 3, 1, 2, 6}

В результате применения теоремы Смита получим оптимальный порядок выполнения поступивших заданий: 4 – 5 – 3 – 1 – 2 – 6 (табл. 3).

Таблица 3

Результат работы алгоритма

Исходные данные	Номер задания					
	$i = 4$	$i = 5$	$i = 3$	$i = 1$	$i = 2$	$i = 6$
tk	1	2	3	4	7	5
$t_k^{ок}$	1	3	6	10	17	22
D_i	12	10	8	22	21	22

В качестве критерия оптимальности расписания для данной задачи подойдет минимизация продолжительности выполнения комплекса работ, реализуемая по формуле (2).

Результаты

В результате внедрения описанного алгоритма построения очереди задач печати в работу автоматизированной системы «Диплом» и ее эксплуатации было показано, что реализованный алгоритм может быть успешно применен с целью обеспечения оперативной печати, повышения оперативности и улучшения показателей информационного взаимодействия между подразделениями. Кроме того, в течение периода эксплуатации был отмечен значительный эффект, заключающийся в снижении числа списываемых бланков государственных бумаг (рис. 3). Так, до внедрения число списанных бланков приложений к диплому насчитывало до 500 экз. в год, а списанных бланков дипломов — до 200 экз. в год. На данный момент число брака в среднем снизилось на 84,3 % для бланков приложений к диплому и 63,8 % для бланков дипломов.



Рис. 3. График изменения числа списанных бланков

Следует отметить, что при проектировании подобных информационных систем необходимо учитывать человеческий фактор: при длительном монотонном вводе данных в процессе утомления человек начинает делать ошибки и пропускать данные. Чтобы обеспечить достоверность вводимой информации, в разработанном прикладном решении предусмотрен механизм сверки введенных данных, который предполагает распечатку «черновиков» подготовленных документов, проверку которых осуществляют выпускники, после чего методист устанавливает флажок «*Сверено*» в соответствующей графе документа «*Сверка данных*» для каждого конкретного студента. Тестирование показало, что данный механизм позволяет снизить число списываемых по причине ошибки ввода данных бланков государственного образца и повысить достоверность информации.

Обсуждение

Теоретической базой для представленного исследования является задача *одного станка*. При решении подобных задач схема последовательного анализа вариантов полностью совпадает со схемой динамического программирования, однако в терминах последовательного анализа схема вычислений выглядит проще, содержательнее и доступнее для понимания.

В работе [4] в качестве критерия эффективности составленного расписания была установлена минимизация времени задержки печати, в настоящей работе — минимизация суммарного времени запаздывания, что, как показал анализ тестирования, позволило достичь лучших результатов. Оценка оптимальности способа организации информационных потоков предлагаемого решения в целом, которая была проведена по критерию, учитывающему отношение завершенных операций к их общему количеству на соответствующий момент времени и при равных условиях, показала, что алгоритм, построенный на базе теоремы Смита, является более оптимальным, чем алгоритм, основанный на методе анализа иерархий.

Для улучшения схемы последовательного анализа вариантов к решению задач *одного станка* можно применить *метод ветвей и границ*. Комбинация последовательного анализа вариантов и метода ветвей и границ приводит к значительному сокращению числа перебираемых вершин дерева.

Заключение

В статье приведены результаты исследования методов организации и оптимизации информационного обеспечения образовательного процесса на примере морского учебного заведения. Рассмотрено применение теоремы Джексона и теоремы Смита для организации оперативного информационного обмена между подразделениями, где вносятся данные об успеваемости выпускников, и подразделением, в котором осуществляется печать. В частности, рассмотрено построение очереди заданий печати, поступающих на обслуживание в заданные моменты времени и обсуживаемые одним прибором, в качестве которого выступает принтер формата А3. Построение очереди

печати базируется на теории расписаний. Выполнен анализ оптимальности применения данного решения и алгоритма, построенного на основе метода анализа иерархий. Внедрение описанного в исследовании алгоритма показало, что он позволяет наиболее оптимально выполнить работу в директивные сроки с соблюдением всех установленных требований.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Васильев В. Н. Модели управления вузом на основе информационных технологий / В. Н. Васильев. — Петрозаводск: Изд-во ПетрГУ, 2000. — 164 с.

2. *Hubalovsky S.* System approach, modeling, simulation as educational technologies in algo-rithm development and programming / S. Hubalovsky // Procedia-Social and behavioral sciences. — 2015. — Vol. 191. — Pp. 2226–2230. DOI: 10.1016/j.sbspro.2015.04.267.

3. *Surej P. J.* The integration of information technology in higher education: A study of faculty's attitude towards IT adoption in the teaching process / P. J. Surej // Contaduría y Administración. — 2015. — № 60. — Pp.230–252. DOI: 10.1016/j.cya.2015.08.004.

4. *Dastan Đ.* The effects of information technology supported education on strategic decision making: an empirical study / Đ. Dastan, M. Çiçek, A. Naralan // Procedia-Social and Behavioral Sciences. — 2011. — Vol. 24. — Pp. 1134–1142. DOI: 10.1016/j.sbspro.2011.09.108.

5. *Hamidi F.* Information technology in education / F. Hamidi, M. Meshkat, M. Rezaee, M. Jafari // Procedia Computer Science. — 2011. — Vol. 3. — Pp. 369–373. DOI: 10.1016/j.procs.2010.12.062.

6. *Boell S. K.* Information: Fundamental positions and their implications for information systems research, education and practice / S. K. Boell //Information and Organization — 2017. — Vol. 27. — Is. 1. — Pp. 1–16. DOI: 10.1016/j.infoandorg.2016.11.002.

7. *Gissi E.* Exploring marine spatial planning education: challenges in structuring transdisciplinarity / E. Gissi, J. L. S. de Vivero // Marine Policy. — 2016. — Vol. 74. — Pp. 43–57. DOI: 10.1016/j.marpol.2016.09.016.

8. *Тындыкарь Л. Н.* Разработка метода организации движения информационных потоков образовательного процесса / Л. Н. Тындыкарь // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2016. — № 1 (35). — С. 197–206. DOI: 10.21821/2309-5180-2016-8-1-197-206.

9. *Егоров А. Н.* Автоматизация учета успеваемости студентов в условиях БРС при наличии различных шкал оценки их знаний / А. Н. Егоров, Н. В. Крупенина, Л. Н. Тындыкарь // Информационные технологии в образовании XXI века: сб. науч. тр. II Всероссийской науч.-практ. конф. — Т. 2. — М.: НИЯУ МИФИ, 2012. — С. 231–235.

10. *Барышникова Н. Ю.* Организация распределенной АИС для печати дипломов о высшем профессиональном образовании / Н. Ю. Барышникова, А. Н. Егоров, Н. В. Крупенина, Л. Н. Тындыкарь // Новые информационные технологии в образовании: сб. науч. тр. XV междунар. науч.-практ. конф. «Новые информационные технологии в образовании» (Применение технологий «1С» для формирования инновационной среды образования и бизнеса), 3 – 4 февраля 2015 г. — М.: ООО «1С-Паблишинг», 2015. — Ч. 1. — С. 547–549.

11. *Тындыкарь Л. Н.* Разработка системы показателей для модели образовательного процесса морского учебного заведения / Л. Н. Тындыкарь // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: управление, вычислительная техника и информатика. — 2016. — № 1. — С. 105–115.

12. *Тындыкарь Л. Н.* К вопросу применения метода анализа иерархий для формирования информационного обеспечения образовательного процесса / Л. Н. Тындыкарь // IT: ВЧЕРА, СЕГОДНЯ, ЗАВТРА: материалы науч. исслед. конф. 11 декабря 2015 г. — СПб.: Изд-во ГУМРФ им. адм. С. О. Макарова, 2016. — С. 274–278.

13. *Прилуцкий М. Х.* Метод ветвей и границ с эвристическими оценками для конвейерной задачи теории расписаний / М. Х. Прилуцкий, В. С. Власов // Вестник Нижегородского университета им. Н. И. Лобачевского. — 2008. — № 3. — С. 147–153.

14. *Гуляев А. В.* Об одном подходе к реализации метода ветвей и границ на распределенной системе / А. В. Гуляев, В. С. Махнычев // Вестник Московского университета. Серия 15: Вычислительная математика и кибернетика. — 2008. — № 3. — С. 60–63.

15. *Kurihara K.* Flow shop scheduling for separation model of set-up and net process based on branch-and-bound method / K. Kurihara, Y.-L. Li, N. Nishiuchi, K. Masuda // Computers & Industrial Engineering. — 2009. — Vol. 57. — Is. 2. — Pp. 550–562. DOI:10.1016/j.cie.2008.08.004.

16. *Тенеев В. А.* Решение задачи многокритериальной оптимизации генетическими алгоритмами / В. А. Тененев // Интеллектуальные системы в производстве. — 2006. — № 2. — С. 103–109.

17. *Стальмаков В. А.* Применение параллельных генетических алгоритмов для составления расписания прохождения судов через шлюзованные системы / В. А. Стальмаков // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2013. — № 1 (20). — С. 16–25.

18. *Стальмаков В. А.* Параллельный генетический алгоритм для решения задачи составления расписания прохождения судов через шлюзованные системы и его верификация / В. А. Стальмаков // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2014. — № 1(23). — С. 93–102.

19. *Астахова И. Ф.* Составление расписания учебных занятий на основе генетического алгоритма / И. Ф. Астахова, А. М. Фирас // Вестник Воронежского государственного университета. Серия: Системный анализ и информационные технологии. — 2013. — № 2. — С. 93–99.

20. *Jackson J. R.* Scheduling a production line to minimize maximum tardiness / J. R. Jackson // Management Science Research. — 1955. — Vol. 43.

21. *Smith W. E.* Various optimizers for single stage production / W. E. Smith // Naval Research Logistics (NRL). — 1956. — Vol. 3. — Is. 1-2. — Pp. 59–66. DOI: 10.1002/nav.3800030106.

REFERENCES

1. Vasilev, V. N. *Modeli upravlenija VUZom na osnove informacionnyh tehnologij.* Petrozavodsk: Izd-vo PetrGU, 2000.

2. Hubalovsky, Stepan. “System approach, modeling, simulation as educational technologies in algorithm development and programming.” *Procedia-Social and Behavioral Sciences* 191 (2015): 2226–2230. DOI: 10.1016/j.sbspro.2015.04.267.

3. Surej, P. John. “The integration of information technology in higher education: A study of faculty’s attitude towards IT adoption in the teaching process.” *Contaduría y Administración* 60 (2015): 230–252. DOI: 10.1016/j.cya.2015.08.004.

4. Dastan, Đkram, Mesut Çiçek, and Abdullah Naralan. “The Effects Of Information Technology Supported Education On Strategic Decision Making: An Empirical Study.” *Procedia-Social and Behavioral Sciences* 24 (2011): 1134-1142. DOI: 10.1016/j.sbspro.2011.09.108.

5. Hamidi F., M. Meshkat, M. Rezaee, and M. Jafari. “Information technology in education.” *Procedia Computer Science* 3 (2011): 369–373. DOI: 10.1016/j.procs.2010.12.062.

6. Boell, Sebastian K. “Information: Fundamental positions and their implications for information systems research, education and practice.” *Information and Organization* 27.1 (2017): 1–16. DOI: 10.1016/j.infoandorg.2016.11.002.

7. Gissi, Elena, and Juan Luis Suarez de Vivero. “Exploring marine spatial planning education: Challenges in structuring transdisciplinarity.” *Marine Policy* 74 (2016): 43–57. DOI: 10.1016/j.marpol.2016.09.016

8. Tyndykar, Ljubov Nikolaevna. “Development of method for organization information support to educational process.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admiral S.O. Makarova* 1(35) (2016): 197–206. DOI: 10.21821/2309-5180-2016-8-1-197-206.

9. Egorov, A. N., N. V. Krupenina, and L. N. Tyndykar. “Avtomatizaciya ucheta uspevaemosti studentov v usloviyah BRS pri nalichii razlichnyh shkal ocenki ih.” *Informacionnuye tehnologii v obrazovanii XXI veka: sbornik nauchnuh trudov II Vserossiiskoy nauchno-practicheskoy konferencii*. Vol. 2. M.: NIYU MIFI, 2012: 231–235.

10. Baryshnikova, N. Ju., A. N. Egorov, N. V. Krupenina, and L. N. Tyndykar. “Organizacija raspredelennoj AIS dlja pechati diplomov o vysshem professional’nom obrazovanii.” *Novye informacionnye tehnologii v obrazovanii: sb. nauch. tr. XV mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoj konferencii «Novye informacionnye tehnologii v obrazovanii» (Primenenie tehnologij «1S» dlja formirovanija innovacionnoj sredy obrazovanija i biznesa), 3–4 fevralja 2015 g.* Vol. 1. M.: OOO «1S-Pablishing», 2015: 547–549.

11. Tyndykar, Lyubov Nikolaevna. “Development of the system of the parameters for a model of educational process at marine educational institution.” *Vestnik of Astrakhan State Technical University. Series: Management, Computer Science and Informatics* 1 (2016): 105–115.

12. Tyndykar, L. N. "K voprosy primeneniya metoda analisa iererhiy dlya formirovaniya informacionnogo obespecheniya obrazovatel'nogo processa." *IT: VChERA, SEGODNJa, ZAVTRA: materialy III nauch.— issled. konferencii studentov i aspirantov fakul'teta informacionnyh tehnologij, 11 december 2015*. SPb.: Izd-vo GUMRF im. adm. S. O. Makarova, 2016: 274–278.

13. Prilutsky, M. Kh., and V. S. Vlasov. "The method of paths and boundaries with heuristic evaluation for a conveyor problem of scheduling theory." *Vestnik of Lobachevsky University of Nizhni Novgorod* 3 (2008): 147–153.

14. Gulyaev, A. V., and V. S. Makhnychev. "On one approach to realization of the branch-and-bound method on a distributed system." *Moscow University Computational Mathematics and Cybernetics* 32.3 (2008): 182–185. DOI: 10.3103/S0278641908030102.

15. Kurihara, Kenzo, Yann-Liang Li, Nobuyuki Nishiuchi, and Kazuaki Masuda. "Flow shop scheduling for separation model of set-up and net process based on Branch-and-Bound method." *Computers & Industrial Engineering* 57.2 (2009): 550–562. DOI: 10.1016/j.cie.2008.08.004.

16. Teneev, V.A. "Reshenie zadachi mnogokriterialnoy optimizacii geneticheskimi algoritmami." *Intellectual'nye sistemy v proizvodstve* 2 (2006): 103–109.

17. Stalmakov, V. A. "Use of parallel genetic algorithms for scheduling of ships passing through the gateways systems." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admiral S.O. Makarova* 1(20) (2013): 16–25.

18. Stalmakov, V.A. "Parallel genetic algorithm for solving scheduling passing through the gateways system and its verification." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admiral S.O. Makarova* 1(23) (2014): 93–102.

19. Astachova, I. F., and A. M. Firas. "Drawing up the schedule of studies on the basis of genetic algorithm." *Proceedings of Voronezh State University. Series: Systems analysis and information technologies* 2 (2013): 93–99.

20. Jackson, J. R. "Scheduling a production line to minimize maximum tardiness." *Management Science Research* 43 (1955).

21. Smith, Wayne E. "Various optimizers for single-stage production." *Naval Research Logistics (NRL)* 3.1-2 (1956): 59–66. DOI: 10.1002/nav.3800030106.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Тындыкарь Любовь Николаевна — аспирант
Научный руководитель:
Крупенина Наталия Викторовна —
кандидат технических наук, профессор
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени
адмирала С. О. Макарова»
198035, Российская Федерация, Санкт-Петербург,
ул. Двинская, 5/7
e-mail: *tyndykar@bk.ru*
Васильченко Дмитрий Сергеевич —
кандидат технических наук
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала
С. О. Макарова»
198035, Российская Федерация, Санкт-Петербург,
ул. Двинская, 5/7
e-mail: *vasilchenkods@gumrf.ru*

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Tyndykar, Ljubov N. — Postgraduate
Supervisor:
Krupenina Natalija Viktorovna —
PhD, professor
Admiral Makarov State University of Maritime
and Inland Shipping
5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg, 198035,
Russian Federation
e-mail: *tyndykar@bk.ru*
Vasilchenko, Dmitrii S. —
PhD
Admiral Makarov State University
of Maritime and Inland Shipping
5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg, 198035,
Russian Federation
e-mail: *vasilchenkods@gumrf.ru*

Статья поступила в редакцию 13 июля 2017 г.
Received: July 13, 2017.

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

DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-4-884-891

DATA BACKUP SYSTEM PLANNING

A. V. Chernyakov

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

In this paper studied the problem of digital data loss, presented actual means and methods of backup, storage and recovery of information, the analysis of the main metrics for designing a reliable data backup systems. A comprehensive study of this problem allows us to guarantee a long-term storage of critical information with guaranteed time of recovery on production sites with minimal downtime. Discussed the main causes of digital data loss and the impact of data corruption for organizations. Highlighted the main differences between backup mechanisms and archiving and long-term data storage. Examined the planning of the backup window, intermediate resource availability and providing necessary and sufficient characteristics of communication channels. Provided a list of organizational and technical means and measures that should be implemented when designing and operating a backup system to ensure its functioning. Examined the long-term storage problematic, the data recovery is impacted by the sizes of copies. Studied the influence of various factors, such as the use of different backup algorithms, the impact of encryption, deduplication and the use of different media on the speed of backup and restore operations. Discusses the advantages and disadvantages of classical backup algorithms, either separately or in combination. Given the analysis of the most common mistakes when planning backup and restore operations because of flaws in technical or organizational means.

Keywords: computing systems design, data backup technologies, data security, data storing systems, algorithms.

For citation:
Chernyakov, Arseniy V. "Data backup system planning." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 9.4 (2017): 884–891. DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-4-884-891.

УДК: 004.414.23

ПРОЕКТИРОВАНИЕ СИСТЕМЫ РЕЗЕРВНОГО КОПИРОВАНИЯ ДАННЫХ

А. В. Черняков

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

В данной работе изучается проблема потери цифровых данных, дается характеристика актуальных методов резервного копирования, хранения и восстановления информации, приводится анализ основных метрик для проектирования надежных систем резервного копирования данных. Всестороннее изучение данной проблемы позволяет обеспечивать долгосрочное хранение критической информации с гарантированным временем восстановления на рабочие площадки с минимальным временем простоя. Рассматриваются главные причины потери цифровых данных и влияние потери данных на работу организаций. Приводятся главные отличия механизмов резервного копирования от механизмов архивирования и долгосрочного хранения данных. Изучаются вопросы планирования окна резервного копирования, промежуточной доступности ресурсов и обеспечения необходимых и достаточных характеристик каналов связи. Приводится перечень организационных и технических мер, которые должны осуществляться при проектировании и эксплуатации любой системы резервного копирования для обеспечения её бесперебойного функционирования. Для изучения проблемы долгосрочного хранения и быстрого восстановления данных производится наглядный анализ размеров создаваемых копий, детально рассматривается проблема быстрого роста итоговых объёмов репозиториев. Изучается влияние различных факторов, таких как использование различных алгоритмов резервного копирования, влияние шифрования, дедупликации и использование различных носителей информации на скорость операций резервного копирования и операций восстановления данных. Рассматриваются достоинства и недостатки классических алгоритмов резервного копирования как по отдельности, так и в комбинации. Производится разбор наиболее частых

ошибок при планировании систем резервного копирования и операций восстановления из-за недостатков технических или организационных средств.

Ключевые слова: проектирование вычислительных систем, технологии резервного копирования, безопасность информации, системы хранения данных, алгоритмы.

Для цитирования:
Черняков А. В. Проектирование системы резервного копирования данных / А. В. Черняков // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2017. — Т. 9. — № 4. — С. 884–891. DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-4-884-891.

Введение

В среднем объем хранимой и обрабатываемой информации различных деловых структур удваивается с интервалом в 1,2 года, и всё больше уникальной и критичной информации для их деятельности существует исключительно в электронном виде, выводя вопрос обеспечения её защиты на первый план [1], [2]. Причины, по которым происходит потеря данных, разнообразны. Наиболее частая причина — отказ оборудования в связи с механическими или электрическими повреждениями, ошибками контроллеров систем хранения данных — 44 % случаев. Почти каждый третий случай утраты связан с человеческим фактором (случайное удаление, неправильная эксплуатация систем хранения данных) — 32 %. Ошибки программного обеспечения при работе с файлами, при резервном копировании и восстановлении составляют 14 % от общего числа случаев потери данных. Вопреки распространённому мнению, компьютерные вирусы являются причиной утраты информации лишь в 7 % случаев, а на долю стихийных бедствий приходится и того меньше — 3 % [3].

Статистика демонстрирует важность защиты данных: после утраты критичной информации 80 % компаний объявляют себя банкротом в течение трех лет, 40 % из которых — в течение первого года. Скорость восстановления информации также играет большую роль: компании, которые не смогли восстановиться в течение 10 дней, в 93 % случаев объявляют банкротство в течение года, 50 % из которых — в течение первого месяца [4].

Несмотря на явную заинтересованность компаний в защите данных, опыт показывает, что их интересы в данной области, как правило, сводятся к одной из трех главных составляющих информационной безопасности, а именно, к конфиденциальности. Несомненно, конфиденциальность — наиболее деликатная тема для государственных учреждений и коммерческих компаний, производящих собственный продукт. Поэтому зачастую обеспечение должного уровня целостности и доступности информации не является определяющим в ходе формулирования требований ко многим информационным системам. Но в ряде случаев данные свойства информации будут являться превалирующими. Так, например, в транспортно-логистической отрасли потеря целостности и доступности информации приводит к существенным материальным убыткам, а в худшем случае — и к человеческим жертвам.

Абсолютной защиты не существует, но наиболее надёжным способом защиты информации от порчи или утраты является *резервное копирование* [5], [6]. Идея этого метода проста — данные, находящиеся в информационной системе, копируются на независимый носитель или дисковую систему, сохраняя, таким образом, своё состояние на определенный момент времени с целью восстановления в случае повреждения или утраты оригинала. Его не следует путать с архивированием — процедурой записи данных в архив для длительного хранения. Зачастую система резервного копирования создается по остаточному принципу — используются аппаратные средства с истекшим ресурсом службы, бывшие в ремонте или и вовсе не предназначенные для такого рода нагрузок (например, использование жестких дисков для персональных компьютеров с ограниченным ресурсом вместо серверных линеек). Так поступают по незнанию или из соображений экономии. Однако, как было отмечено, экономические последствия от неправильно спроектированной системы резервного копирования могут быть крупнее полученной выгоды. Подробный разбор экономической составляющей останется за переделами этой работы. Сосредоточимся на тезисе о незнании и устраним нехватку материалов по теме проектирования подобных систем.

В рамках данной работы рассматривается проектирование отказоустойчивых систем резервного копирования от сбора информации о системе и её емкостях до сопровождения в течение длительной эксплуатации, а именно применения различных алгоритмов резервного копирования и их влияния на размер репозитория копий и времени восстановления.

Методы и материалы

Для сокращения объема репозитория применяют различные алгоритмы резервного копирования. Наибольшей популярностью пользуются полное, инкрементное и дифференциальное резервирование [5]. Эти алгоритмы могут применяться как по отдельности, так и вместе. Кроме того, во избежание многократного сохранения одних и тех же данных, применяют метод дедупликации, заключающийся в исключении из резервной копии повторяющихся блоков данных и заменой их на ссылки [6].

Исследования эффективности алгоритмов показывают, какой объём при равных условиях занимают данные в репозитории резервных копий при использовании различных алгоритмов [7]. Так, наиболее требовательным к количеству доступного места является алгоритм полного резервного копирования из-за большого количества повторяющихся данных. Менее требовательным является алгоритм дифференциального копирования. Однако при отсутствии ротации копий, из-за большого количества измененных данных, может потребоваться больший объём системы хранения данных, чем при использовании полного архивирования. Наименее требовательным к дисковым ресурсам, а также наиболее быстрым при создании копии является алгоритм инкрементного копирования.

Метод многоуровневого резервного копирования основан на идее ротации резервных копий. Его ключевыми параметрами являются период резервирования, количество уровней и частота создания копий. На «нулевом» уровне создаётся полная резервная копия данных, на последующих — дифференциальные по отношению к предыдущему, или своему, уровню. Наиболее популярной является схема с тремя уровнями: полная резервная копия создаётся ежемесячно и хранится в течение года, дифференциальная копия первого уровня создаётся еженедельно и хранится один месяц, дифференциальная копия второго уровня создаётся ежедневно и хранится в течение недели. Это позволяет использовать самую сильную сторону дифференциального копирования — малый объём копий, сведя к минимуму недостаток — долгое время восстановления [8].

Предлагаемый алгоритм позволяет комплексно проанализировать инфраструктуру, выделить основные требования к системе, возможные ограничения, накладываемые средой, и эффективно внедрить разработанное решение. Проектирование системы резервного копирования можно условно разделить на два этапа, состоящих из нескольких шагов.

Этап 1 — административный

1. *Определение объёма копируемых данных*. Самым важным шагом можно по праву считать определение наиболее критичной информации, потеря которой может негативно или губительно сказаться на бизнес-процессах. Правильно проведя границу между ключевыми и вспомогательными данными, можно существенно сократить расходы на систему резервного копирования, уменьшив время снятия копий и требуемый объём дискового пространства.

2. *Задание частоты снятия копий*. На этом шаге необходимо определить минимальный отрезок времени, пропадание данных за который неприемлемо. Данный параметр целиком зависит от частоты изменения обозначенных данных. От него зависит не только объём репозитория резервных копий, но и версионность данных. Для каждого информационного актива этот параметр должен быть задан индивидуально.

3. *Оценка изменения данных*. Этот параметр выражает количественное изменение данных между операциями резервного копирования. Данный процент определяется экспериментально и служит основой для долгосрочного планирования объёма носителей и емкости интерфейсов системы резервного копирования.

4. *Определение допустимого времени снятия резервных копий.* Планирование так называемого «окна» резервного копирования, когда данные не используются или используются только для чтения. Это то время, в течение которого можно проводить резервное копирование. Чаще всего оно попадает на нерабочее время — вечер и ночь. В том случае, когда данные должны быть доступны для чтения и записи постоянно (системы высокой доступности), следует использовать специальные средства для копирования, такие как VSS, снэпшоты файловой системы [9].

5. *Определение необходимой ёмкости для системы резервного копирования*. Под ёмкостью понимается количество данных, которые система может принять во время окна копирования. Ёмкость вычисляется по формуле [10]:

$$C(\text{Гб}) = \sum_{\text{интерфейсов СРК}} w(\text{ч}) \cdot r\left(\frac{\text{МБ}}{\text{с}}\right) \cdot \frac{3600}{1000}, \quad (1)$$

где C — ёмкость СРК (ГБ); w — окно резервного копирования (ч); r — скорость передачи резервируемых данных с клиента в СРК (Гб/ч).

Если количество данных D, подлежащих резервному копированию в этот сеанс, превышает ёмкость системы, следует либо расширить систему за счет новых интерфейсов обмена, либо уменьшить количество данных, либо увеличить окно резервного копирования. В качестве r следует взять наименьшую из скоростей записи на носитель и скорости интерфейса обмена данными.

6. *Определение правил хранения резервных копий*. На этом шаге следует установить место хранения оперативной копии (это может быть система с низким временем доступа и высокой пропускной способностью, находящаяся в непосредственной близости от систем-клиентов), место хранения более старых, но актуальных копий: порядок помещения копии в архив, степень дедупликации, а также хранение копий в соответствии с политикой информационной безопасности предприятия и допуска сотрудников к хранилищам копий.

7. *Определение метода проверки резервных копий.* Если во время снятия копий произошла ошибка, она может остаться незамеченной вплоть до попытки восстановления из этой копии. Проверка чаще всего осуществляется математическими методами самого́ программного обеспечения системы резервного копирования, но наиболее надёжным является метод восстановления данных «в песочнице» для проверки их целостности. Этот шаг призван регламентировать методы защиты от ошибок.

8. *Определение метода утилизации носителей.* Носители с истекшим сроком годности могут быть помещены в архив, а могут быть утилизированы. На этом шаге следует указать метод уничтожения неактуальных резервных копий. Он должен быть согласован с политикой информационной безопасности предприятия.

Этап 2 — проектирование (анализ имеющейся) системы резервного копирования

1. *Определение пропускной способности интерфейса системы резервного копирования*. Необходимая скорость получения данных для завершения создания копии, не выходя за рамки окна резервного копирования, вычисляется как отношение объема копируемых данных D к окну резервного копирования w. Если система резервного копирования осуществляет связь с клиентами по сети, необходимо учитывать пропускную способность канала, которая будет равна пропускной способности наименее производительного участка. Формула (2) иллюстрирует сравнение пропускной способности интерфейса B с необходимой скоростью получения данных R_n:

$$R_n\left(\frac{\text{Гб}}{\text{ч}}\right) \cdot 8 \le B\left(\frac{\text{Мбит}}{\text{с}}\right) \cdot \frac{3600}{1000}, \quad (2)$$

где R_n — необходимая скорость передачи резервируемых данных (Гб/ч); B — пропускная полоса канала передачи данных (Мбит/с).

Если неравенство не выполняется, то имеющаяся среда передачи данных не обеспечивает достаточной скорости передачи информации.

2. *Определение пропускной способности интерфейса клиента системысистемы*, т. е. скорости, с которой клиент системы резервного копирования может принимать и получать от неё данные. Равна наименьшей из скоростей чтения / записи запоминающего устройства или канала передачи информации.

3. *Выбор оптимального алгоритма снятия резервных копий*. От выбора алгоритма резервного копирования зависит очень многое, в частности время копирования и восстановления, объём передаваемых данных, объём репозитория резервных копий, метод их хранения. Эти вопросы были уже рассмотрены в статье.

4. *Определение времени снятия и восстановления копий* (включает в себя время чтения и записи, пропускную способность канала). На этом шаге определяется реальная скорость копирования и восстановления данных. В случае, если время превышает допустимое, проводится структурный анализ системы резервного копирования и принимается решение о добавлении новых промежуточных узлов или использовании более быстрого канала.

Результаты

Для наглядного представления приведенных методов рассмотрим следующую ситуацию: первоначальный объём данных D_0 равен 100 ГБ, период снятия резервных копий d составляет один день, между операциями резервного копирования изменяется 5 % данных (модификатор $p = 0{,}05$). Для многоуровневой схемы установим следующее расписание ротации: полное резервное копирование осуществляется один раз в 14 дней, дифференциальное по отношению к полному — один раз в 7 дней, инкрементное по отношению к предыдущей копии — ежедневно. Объём данных D_n через n дней вычисляется по формуле

$$D_n = (1 + p)^n D_0, \tag{3}$$

где D_n — объём данных, подлежащих копированию, к n-му дню, Гб; D_0 — начальный объём данных для копирования, Гб; p — модификатор изменения данных.

Проиллюстрируем объём создаваемой резервной копии при четырех схемах резервного копирования при помощи данных, приведенных в таблице.

Сравнение объёма резервной копии снятой различными алгоритмами, Гб

День	D_n	Full	Diff	Inc	ML3
0	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
1	105,00	105,00	5,00	5,00	5,00
2	110,25	110,25	10,25	5,25	5,25
3	115,76	115,76	15,76	5,51	10,51
4	121,55	121,55	21,55	5,79	11,04
5	127,63	127,63	27,63	6,08	16,59
6	134,01	134,01	34,01	6,38	17,42
7	140,71	140,71	40,71	6,70	40,71
8	147,75	147,75	47,75	7,04	24,46
9	155,13	155,13	55,13	7,39	30,68
10	162,89	162,89	62,89	7,76	32,21
11	171,03	171,03	71,03	8,14	38,82
12	179,59	179,59	79,59	8,55	40,76
13	188,56	188,56	88,56	8,98	47,80
14	197,99	197,99	97,99	9,43	197,99
Итого		**2 057,86**	**657,86**	**97,99**	**320,57**

Обсуждение

Проведем сравнительный анализ результатов. Наглядно показано, что алгоритм полного копирования сохраняет большое количество дублируемой информации, в результате чего объём репозитория растет очень быстро. Дифференциальный подход показывает хороший результат на коротком промежутке, начиная с 5 % объёма полной резервной копии, но уже к концу 14-го дня дифференциальная копия составляет около 50 % от полной. Инкрементный алгоритм является наилучшим с точки зрения экономии ресурсов при создании копий, однако легко показать, что он обладает более низкой надёжностью по сравнению с указанными. Из-за отсутствия избыточности данных, при утрате одной копии в цепочке их восстановление становится невозможным. Использование всех трех алгоритмов в многоуровневой схеме показывает хороший результат по времени копирования и требуемому объёму. Недостатком является неравномерное использование системы резервного копирования (при переходе на нижележащий уровень количество копируемых данных возрастает по отношению к верхним уровням). Это может негативно сказаться на планировании окна резервного копирования [11].

Для организации надежной системы резервного копирования требуется составить перечень информационных ресурсов, подлежащих защите, приоритезировать резервное копирование критичной информации, задать время хранения и частоту создания копий, определить меры безопасности по пресечению неавторизированного доступа, рассчитать необходимый размер репозитория для долгосрочного и оперативного хранения информации.

Для обеспечения безопасности данных при снятии резервных копий практикуется их шифрование. Зашифрованные данные, как правило, занимают больший объём, плохо поддаются сжатию, а их восстановление занимает больше времени и требует бóльших вычислительных ресурсов, чем не зашифрованные, однако оно позволяет избежать рисков кражи или подмены информации в репозитории. Зачастую шифровать все данные не требуется, достаточно обеспечить защиту наиболее критичной информации [12].

При проектировании систем резервного копирования обязательным шагом является составление расписания ротации резервных копий, что позволяет гибко распределить ресурсы системы резервного копирования. Так, оперативная копия может храниться на серверах с высокой доступностью, архивные копии — на сторонних носителях: оптических дисках, ленточных накопителях или на вспомогательных серверах. Количество оперативных и архивных копий следует рассчитать с учётом требований ко времени восстановления и продолжительности хранения информации. Кроме того, следует учитывать доступный объём системы хранения данных, определенной для архива и репозитория.

Для определения требований к технической базе системы резервного копирования может применяться подход, лежащий в основе систем управления жизненным циклом информации (Information Lifecycle Management, ILM), который постулирует динамичность ценности информации на основе её актуальности в бизнес-процессах. С его помощью можно отделить критичные данные, требующие высокой скорости доступа, частого резервирования и быстрого восстановления, от более простых и менее критичных данных, расположив их на разных технических площадках [13].

Заключение

Приведенный план позволяет формализовать требования и спроектировать надёжную систему резервного копирования. Это особенно актуально на крупных предприятиях стратегического значения, какими являются транспортно-логистические кластеры и их отдельные составляющие: аэро- и морские порты, грузовые и пассажирские хабы и многие другие предприятия транспортной отрасли, от бесперебойного функционирования которых зависит экономика.

Тема резервного копирования настолько же важна, насколько и обширна. Она охватывает множество аспектов взаимодействия человека и вычислительной техники, обеспечивая защиту от порчи или утраты интеллектуального труда или иных данных, хранящихся в цифровом виде. Ошибки, допущенные при проектировании систем резервного копирования, могут привести к по-

тере данных, компенсировать которую сможет не каждая компания. Некачественный или редкий аудит системы может дать ложное ощущение безопасности.

Для проектирования надежной системы необходимо выполнить комплекс административно-технических мер по приоритезации информационных активов, анализу окружения, планированию расписания резервирования, созданию регламентирующих процедур и документов. Освещаемые в статье вопросы помогут собрать необходимые данные о среде и подготовить базу для создания надежной системы резервного копирования.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Australian organizations facing acute threat of cyber-attack [Электронный ресурс]. — Режим доступа: www.bsigroup.com/en-AU/About-BSI/Media-Centre/Press-Releases/2013-News/November/Australian-Organizations-Facing--Acute-Threat-Of-Cyber-Attacks/ (дата обращения: 21.12.2016).

2. *Nyrkov A. P.* Providing the integrity and availability in the process of data transfer in the electronic documents management systems of transport-logistical clusters / A. P. Nyrkov, S. S. Sokolov, S. G. Chernyi, A. V. Chernyakov, A. S. Karpina // Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM), International Conference on. — IEEE, 2016. — Pp. 1–4. DOI: 10.1109/ICIEAM.2016.7910915.

3. Avoiding the hidden costs of the Cloud [Электронный ресурс]. — Режим доступа: http://www.symantec.com/content/en/us/about/media/pdfs/b-state-of-cloud-global-results-2013.en-us.pdf (дата обращения: 17.06.2016).

4. SaaS Data Loss: The Problem You Didn't Know You Had [Электронный ресурс]. — Режим доступа: http://resources.healthdatamanagement.com/content28634 (Дата обращения: 17.06.2016).

5. *Черняков А. В.* Алгоритмы резервного копирования / А. В. Черняков, А. П. Нырков // IT: вчера, сегодня, завтра: материалы III науч.-исслед. конф. факультета информационных технологий. — СПб.: Изд-во ГУМРФ им. адм. С. О. Макарова, 2015. — С. 129–133.

6. *Нырков А. П.* Дедупликация данных в системах резервного копирования / А. П. Нырков, А. В. Черняков // Информационные управляющие системы и технологии: материалы IV Междунар. науч.-практ. конф. (ИУСТ-ОДЕССА-2015). — Одесса, 2015. — С. 130–133.

7. *Chervenak A.* Evaluating Backup Algorithms / A. Chervenak, Z. Kurmas / Proceedings of the Eighth Goddard Conference on Mass Storage Systems and Technologies. — USA, Maryland, 2000. — Pp. 235–242.

8. *Joanna O.* Multilevel backups / O. Joanna, S. Stafford, A. Weeks, L. Wizenius // The Linux System Administrator's Guide. — USA, 2004. — Pp. 83–89.

9. *Черняков А. В.* Механизмы защиты данных в файловых системах / А. В. Черняков, А. П. Нырков // IT: ВЧЕРА, СЕГОДНЯ, ЗАВТРА: материалы IV науч.-исслед. конф. студентов и аспирантов Института водного транспорта. — СПб.: Изд-во ГУМРФ им. адм. С. О. Макарова, 2016. — С. 291–296.

10. Handbook of Network and System Administration / J. Bergstra, M. Burgess, eds. — 1st Edition. — Elsevier, 2007. — 1016 p.

11. *Ranjith G.* A Multiple Segmented Backups Scheme for Dependable Real-time Communication in Multihop Networks / G. Ranjith, C. Siva Ram Murthy // Proceedings of The International Parallel and Distributed Processing Symposium. — USA, 2003. — Pp. 123–130.

12. *Нырков А. П.* Алгоритмы резервного копирования для обеспечения защиты данных / А. П. Нырков, А. В. Черняков // Информационная безопасность регионов России (ИБРР-2015): материалы конф. — СПб.: Изд-во СПОИСУ, 2015. — С. 127–128.

13. *Stephens D.* Records Management: Making the Transition from Paper to Electronic / D. Stephens. — Overland Park, KS: ARMA International, 2007. — 292 p.

REFERENCES

1. Australian organizations facing acute threat of cyber-attack. Web. 21 Dec. 2016 <www.bsigroup.com/en-AU/About-BSI/Media-Centre/Press-Releases/2013-News/November/Australian-Organizations-Facing--Acute-Threat-Of-Cyber-Attacks/>.

2. Nyrkov, A., S. Sokolov, S. Chernyi, A. Chernyakov, and A. Karpina. "Providing the integrity and availability in the process of data transfer in the electronic documents management systems of transport-logistical clus-

ters." *Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM), International Conference on*. IEEE, 2016. DOI: 10.1109/ICIEAM.2016.7910915.

3. Avoiding the hidden costs of the Cloud. Web. 17 June 2016 <www.symantec.com/content/en/us/about/media/pdfs/b-state-of-cloud-global-results-2013.en-us.pdf>

4. SaaS Data Loss: The Problem You Didn't Know You Had. Web. 17 June 2016 <resources.healthdatamanagement.com/content28634>.

5. Chernyakov, A. V., and A. P. Nyrkov. "Algoritmy rezervnogo kopirovaniya." *IT: vchera, segodnya, zavtra Materialy III nauchno-issledovatel'skoi konferentsii fakul'teta informatsionnykh tekhnologii*. SPb.: GUMRF imeni admirala S.O. Makarova, 2015. — S. 129–133.

6. Nyrkov, A. P., and A. V. Chernyakov. "Deduplikatsiya dannykh v sistemakh rezervnogo kopirovaniya." *Informatsionnye upravlyayushchie sistemy i tekhnologii Materialy IV Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii (IUST-ODESSA-2015)*. Odessa, 2015: 130–133.

7. Chervenak, A., and Z. Kurmas. "Evaluating Backup Algorithms." *Proceedings of the Eighth Goddard Conference on Mass Storage Systems and Technologies*. USA, Maryland, 2000: 235–242.

8. Joanna, O., S. Stafford, A. Weeks, and L. Wizenius. "Multilevel backups." *The Linux System Administrator's Guide*. USA, 2004: 83–89.

9. Chernyakov, A. V., and A. P. Nyrkov. "Mekhanizmy zashchity dannykh v failovykh sistemakh." *IT: VCh-ERA, SEGODNYa, ZAVTRA: Materialy IV nauchno-issledovatel'skoi konferentsii studentov i aspirantov Instituta vodnogo transporta*. SPb.: GUMRF imeni admirala S.O. Makarova, 2016: 291–296.

10. Bergstra, J., and M. Burgess, eds. *Handbook of Network and System Administration*. 1st Edition. Elsevier, 2007.

11. Ranjith, G., and C. Siva Ram Murthy. "A Multiple Segmented Backups Scheme for Dependable Real-time Communication in Multihop Networks." *Proceedings of The International Parallel and Distributed Processing Symposium*. USA, 2003: 123–130.

12. Nyrkov, A. P., and A. V. Chernyakov. "Algoritmy rezervnogo kopirovaniya dlya obespecheniya zashchity dannykh." *Information security of Russian regions (ISRR-2015). IX St. Petersburg interregional conference*. St. Petersburg, 2015: 127–128.

13. Stephens, D. *Records Management: Making the Transition from Paper to Electronic*. Overland Park, KS: ARMA International, 2007.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Черняков Арсений Вениаминович — аспирант
Научный руководитель:
Нырков Анатолий Павлович — доктор технических наук, профессор
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова»
198035, Российская Федерация, Санкт-Петербург, ул. Двинская, 5/7
e-mail: *m@avc.su*, *kaf_koib@gumrf.ru*

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Chernyakov, Arseniy V. — Postgraduate
Supervisor:
Nyrkov, Anatoliy P. —
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: *m@avc.su*, *kaf_koib@gumrf.ru*

Статья поступила в редакцию 15 июля 2017 г.
Received: July 15, 2017.

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

DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-4-892-901

DISTRIBUTED COMPUTING FOR OPTIMIZATION OF OPERATIONAL MANAGEMENT OF THE TRANSPORT CONVEYOR OF LOCK SYSTEM

V. A. Kuznetsov

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

On the inland waterways of Russia, which are part of a single transport system, there are more than 150 locks, most of which are integrated in the lock systems. The automation measures and, inevitably, the optimization of operational management of the transport conveyor of lock system, are able, first, reduce operation of lock canals and transportation costs, by saving energy and time resources, second, in the case of a high ships flow, increase the capacity of the canals to relieve them. At the moment systems implementing automated dispatching passing of the whole lock canal, not created. It is concluded that this requires the use of the system that allows the automatic exchange of information between ships and shore services, as well as high-performance multicomputer systems, features of creation of which are considered in the article.

As the environment of implementing is proposed distributed computer system that allows you to combine multiple computers using a universal program shell of parallelizing for cooperative processing. Its model and implementation feature is presented in the article. It is noted that its main purpose is organization of efficient execution of user application solution, using for them compute capacity of the computer devices that allow parallelization. Their integration into a single compute cluster, when solving the problems of optimization of operational management of lock system, gives the following advantages. First, allows to form hardware-software complexes of any computing power, the required value of which is determined by the parameters of the lock canal, and, if necessary, to increase computing power during work; second, it increases system fault tolerance, which is an important factor in the operation of such objects.

Keywords: optimization of operational management, lock canal, distributed computing system, parallel algorithms, cluster.

For citation:
Kuznetsov, Vitaliy A. "Distributed computing for optimization of operational management of the transport conveyor of lock system." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 9.4 (2017): 892–901. DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-4-892-901.

УДК 004.42

РАСПРЕДЕЛЁННЫЕ ВЫЧИСЛЕНИЯ ДЛЯ ОПТИМИЗАЦИИ ОПЕРАТИВНОГО УПРАВЛЕНИЯ ТРАНСПОРТНЫМ КОНВЕЙЕРОМ ШЛЮЗОВАННОЙ СИСТЕМЫ

В. А. Кузнецов

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

На внутренних водных путях России, являющихся частью единой транспортной системы, насчитывается более 150 шлюзов, большинство из которых интегрированы в шлюзованные системы. Мероприятия по автоматизации и, как следствие, оптимизации оперативного управления судопропуском способны, во-первых, сократить затраты на эксплуатацию шлюзованных судоходных каналов и себестоимость перевозок за счёт экономии энергетических и временных ресурсов, во-вторых, в случае повышенного судопотока, увеличить пропускную способность каналов для их разгрузки. На данный момент систем, реализующих автоматизированную диспетчеризацию шлюзованного судоходного канала в целом, не создано. Делается вывод, о том, что для этого необходимо использовать системы, обеспечивающие автоматический обмен информацией между судами и береговыми службами, а также высокопроизводительные многомашинные вычислительные комплексы, особенности построения которых рассматриваются в статье.

В качестве среды реализации предлагается распределённая вычислительная система, которая позволяет объединять множество компьютеров, использующих универсальную программную оболочку распараллеливания для совместной обработки данных. Описывается её модель и особенности функционирования. Отмечается, что основным назначением программной оболочки является организация эффективного выполнения прикладного решения пользователя с использованием вычислительной мощности устройств компьютера, допускающих распараллеливание. Их объединение в единый вычислительный кластер при решении вопросов оптимизации оперативного управления шлюзованной системы даёт следующие преимущества: во-первых, позволяет формировать аппаратно-программные комплексы любой вычислительной мощности, требуемый уровень которой определяется параметрами судоходного канала, и при необходимости наращивать её в процессе эксплуатации; во-вторых, повышает отказоустойчивость системы, что является важным фактором при функционировании такого рода объектов.

Ключевые слова: оптимизация оперативного управления, шлюзованные судоходные каналы, распределенные вычислительные системы, параллельные алгоритмы, кластер.

Для цитирования:
Кузнецов В. А. Распределённые вычисления для оптимизации оперативного управления транспортным конвейером шлюзованной системы / В. А. Кузнецов // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2017. — Т. 9. — № 4. — С. 892–901. DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-4-892-901.

Введение

В статье [1] рассматриваются вопросы оптимизации оперативного управления транспортным конвейером шлюзованного судоходного канала (ШСК). Обосновывается возможность реализации автоматизированной диспетчеризации судопропуска на основе взаимодействия имитационной модели и алгоритма управления в реальном масштабе времени, конечной целью которых является расписание проводки судов. До настоящего времени подобных систем, работающих в рамках ШСК в целом, не создано. Делается вывод о том, что для этого необходимо использовать системы, обеспечивающие автоматический обмен информацией между судами и береговыми службами, а также параллельные алгоритмы обработки данных. В качестве среды реализации предложена универсальная программная оболочка распараллеливания (ПОР). Рассматриваются её модель и особенности функционирования. Основным назначением ПОР является эффективное исполнение прикладного решения пользователя. Для этих целей программная оболочка использует весь потенциал подключенных к компьютеру вычислительных устройств, допускающих распараллеливание.

Описанный подход позволяет сформировать оптимальное расписание по выбранному критерию, например, минимальный расход энергоресурсов или минимум совокупных потерь провозной способности флота при прохождении канала, что, в свою очередь, позволит снизить затраты на эксплуатацию шлюзованной системы и (или) себестоимость перевозок. В процессе функционирования автоматизированной системы оптимизации оперативного управления судопропуском критерий можно динамически изменять, тем самым адаптируясь к ситуации на канале. Так, при повышенном судопотоке для разгрузки ШСК целесообразно направить оптимизацию расписания проводки судов на увеличение его пропускной способности.

Несомненно, использование ПОР позволяет существенно повысить эффективность вычислений, однако в связи с физическими ограничениями полностью решить вопросы производительности, используя ресурсы одного компьютера, не представляется возможным [2]. Решить указанную проблему можно за счёт объединения компьютеров в единую распределённую вычислительную систему (РВС) или кластер [3]. Следует отметить, что реализация параллельной обработки данных на устройствах одного компьютера и в рамках РВС — концептуально разные задачи [4].

Особенности построения РВС

Вычислительная мощность кластера зависит от количества узлов в нём, их аппаратных и программных ресурсов, а также алгоритма распределения (балансировки) нагрузки между ними. На практике организация эффективной РВС — достаточно трудоёмкая задача. Это объясняется

наличием множества факторов, часто взаимосвязанных между собой, которые влияют на её производительность. Ограничения служб и алгоритмов, связанные с использованием определённого типа оборудования, технологий или ПО, зачастую выступают своего рода «тормозом» увеличения количества узлов [5]. Степень проблемы зависит от требований конкретной системы. Так, для открытых глобальных РВС характерно разнообразие технических и программных средств, входящих в неё компонентов, что требует применения кроссплатформенных решений для обеспечения совместной работы приложений на широком диапазоне платформ [2], [6]. Как правило, в локальных вычислительных кластерах используется однородное оборудование и ПО, подобранное для максимально эффективного решения поставленных задач.

От количества узлов в РВС зависит нагрузка на сервер, что накладывает ограничения на максимальное количество узлов, поддерживаемое кластером [7]. Дальнейшее увеличение их числа возможно за счёт повышения пропускной способности сетей и мощности сервера. Использование децентрализованной архитектуры, в которой узлы взаимодействуют друг с другом напрямую, без участия единого центра, позволяет полностью решить вопросы нехватки производительности серверов. При этом, в силу сложной организации такой РВС по сравнению с централизованной, возрастают требования к узлам системы и нагрузка на сети передачи данных.

Сбои в работе вычислительных систем, построенных на базе единичных компьютеров, зачастую приводят к полному отказу в работоспособности. Кластеры более устойчивы к подобным отказам за счёт избыточности аппаратных и программных ресурсов. При выходе из строя одного из узлов выполняемый им объём работ распределяется между другими компонентами системы, что обеспечивает её бесперебойную работу. Функционирование РВС с централизованной архитектурой зависит от сервера, выход из строя которого приводит к остановке работы всей системы. В такой ситуации для повышения отказоустойчивости необходимо использовать кластеры серверов, обеспечивающих единый функционал.

Наряду с характеристиками узлов и их количеством в кластере одним из важнейших факторов, влияющих на производительность и скорость работы РВС, является алгоритм распределения нагрузки между узлами [8], [9]. Стратегия балансировки должна учитывать множество факторов, основными из которых являются: размерность и сложность задач, различия аппаратных и программных ресурсов узлов системы, пропускная способность средств коммуникации [7], [10]. Также распределение необходимо выполнять таким образом, чтобы обеспечить оптимальное количество обращений между компонентами системы, это позволит уменьшить временные затраты на синхронизацию, снизить нагрузку на сети передачи данных и сервер.

Балансировка бывает *статической* и *динамической* [9]. Статическая балансировка выполняется за счёт априорного анализа конфигурации РВС, её структуры и характеристик, входящих в неё компонентов. Основной недостаток такого подхода заключается в том, что нагрузка не меняется в ходе работы системы, при этом не учитываются такие показатели, как текущая загруженность узлов и сетей передачи данных, сбои в работе её компонентов, изменение количества узлов или их конфигурации. При динамической балансировке нагрузка на узлы рассчитывается в процессе функционирования вычислительного кластера с учётом его текущего состояния, что, в свою очередь, предполагает реализацию системы мониторинга. Динамическая балансировка также позволяет использовать программное обеспечение, работоспособность которого не зависит от структуры распределённой системы [7].

Построение РВС на базе ПОР

Для организации совместных распределённых вычислений двух и более ПОР реализуется РВС централизованной архитектуры, что означает наличие единого центра управление (ЦУ) вычислительным процессом. ЦУ обеспечивает подключение и взаимодействие с множеством ПОР через сеть, а также максимально эффективное распределение вычислительной нагрузки между ними.

Изменения в реализации ПОР касаются переноса функций по контролю и организации процесса решения пользовательской задачи (ПЗ) от программной оболочки к ЦУ и добавления модуля

для работы с ним. При этом обработка взаимодействия с аппаратными ресурсами компьютера и пользователя не изменилась. Это означает, что приём и формирование ПЗ, а также вывод результата его решения, по-прежнему выполняет ПОР. После инициализации ПЗ отправляется ЦУ. Решение задачи в ЦУ осуществляется за счёт её декомпозиции на части, именуемые *сегментами*, каждый из которых передаётся на решение одному из свободных узлов кластера. Создание сегмента пользовательской задачи (СПЗ) осуществляется с помощью dll-библиотеки, которая реализуется для каждого типа задачи. При выборе оптимального размера СПЗ анализируются характеристики, информация об оборудовании и вычислительной мощности узла, для которого этот сегмент формируется. Как только СПЗ будет решён, ПОР отправляет результат ЦУ, который обрабатывает его и в случае получения конечного решения ПЗ возвращает результат отправителю этой задачи. Таким образом, каждый участник РВС не только предоставляет вычислительную мощность своего компьютера, но также может сам воспользоваться ресурсами системы.

Рассмотрим подробнее изменения в работы ПОР, в качестве узла РВС, и модель функционирования вычислительного кластера.

Алгоритм работы ПОР совместно с ЦУ

ПОР представляет собой совокупность взаимодействующих модулей [1]. Связующим звеном этих модулей является ядро программной оболочки (ЯПО). Вся основная логика работы ПОР заложена во взаимодействии ЯПО с модулями устройств (МУ), которые выполняют основную работу вычислений ПОР — решение ПЗ. Алгоритм решения реализуется в виде dll-библиотек, разработанных для каждого типа устройства, работающего с ПОР. Каждая библиотека должна содержать значения параметров, требуемых для настройки среды программной оболочки, таких как размер массива бинарных данных задачи и результата её решения; идентификатор задачи и др. Также необходимо реализовать ряд экспортных функций, обеспечивающих выполнение следующих операций:

– Score — оценка производительности устройства;

– Parser — проверка, обработка и формирование данных ПЗ;

– Cut — формирование данных подзадачи;

– SimSim — решение подзадачи;

– Result и ResultBuild — формирование общего решения ПЗ.

Опишем работу ЦУ и ПОР в виде пошагового алгоритма. Следует отметить, что СПЗ — это часть ПЗ, которую отправляет ЦУ для решения ПОР, в свою очередь, подзадача — часть СПЗ, которая отправляется МУ для обработки.

Этап 1. Создание МУ, отвечающих за взаимодействие с конкретным аппаратным средством на основе информации, сформированной в результате предварительного анализа вычислительных устройств компьютера, с которыми поддерживает работу ПОР.

Этап 2. Подключение ПОР к ЦУ, при этом передаётся конфигурация узла.

Этап 3. Инициализация задачи ПОР посредством считывания и обработки данных конфигурационного файла, созданного пользователем, который содержит информацию о типе задачи и бинарные данные задачи, соответствующие выбранному типу. Передача сформированной задачи ЦУ.

Этап 4. ЦУ отправляет задачу на решение множеству подключённых к ЦУ ПОР, при этом для каждого узла на основании его конфигурации формируются данные СПЗ.

Этап 5. Решение полученного сегмента задачи в ПОР:

– *шаг* 1 — с помощью функции Score, вызванной из соответствующей dll-библиотеки, оценивается скорость решения текущего сегмента задачи на определенном устройстве;

– *шаг* 2 — ЯПО отправляет задачу на решение множеству параллельно работающих МУ, при этом, в зависимости от оценки производительности устройства, модуль Cute формирует данные подзадачи для каждого МУ;

– *шаг* 3 — в процессе решения подзадачи модуль SimSim осуществляет дополнительное распараллеливание вычислительного процесса, используя особенности аппаратного средства;

– *шаг* 4 — после решения подзадачи МУ отправляет результат ЯПО;

– *шаг* 5 — формирование результата решения сегмента задачи на основе информации, полученной от МУ, и отправка его ЦУ.

Этап 6. Формирование общего результата решения ПЗ, на основе информации, полученной от узлов кластера, и отправка его в ПОР, который её инициализировал.

Модель функционирования РВС на базе ПОР

При формировании требований к параллельным и распределённым алгоритмам наиболее важным является определение последовательности определённых событий для каждого вычисления программы. Это позволяет для описания модели организации совместных распределённых вычислений двух и более ПОР использовать язык темпоральной логики линейного времени (LTL), в котором явно учтен феномен времени. Каждое событие будет характеризоваться булевой переменной, которая принимает значение «Истина» тогда и только тогда, когда наступает событие.

В LTL, помимо булевых логических связок, для описания причинно-следственной зависимости событий во времени используются темпоральные операторы:

– Xφ «в следующий момент времени», указывает на то, что φ выполняется на следующем состоянии пути;

– Fφ «когда-то в будущем», указывает на то, что φ будет соблюдаться в каком-то последующем состоянии пути;

– Gφ «всегда», указывает на то, что φ выполняется в каждом состоянии пути;

– φUψ «до тех пор, пока», указывает на то, что φ выполняется до тех пор, пока не станет верно ψ;

– φRψ «высвободить, открепить», указывает на то, что ψ может перестать быть верным только после того, как станет верно φ.

Также введём следующие атомарные высказывания, соответствующие основным событиям вычислений программы:

– try_task_i — *i*-й пользователь собирается отправить задачу;
– add_task_i — *i*-я ПЗ добавляется в очередь задач;
– del_task_i — *i*-я ПЗ удаляется из очереди задач;
– $send\_task_i$ — *i*-я ПЗ отправляется на решение ЯПО;
– $create\_segment_i$ — *i*-я СПЗ формируется из ПЗ;
– $send\_segment_i$ — *i*-я СПЗ отправляется на решение МУ;
– $create\_subtask_i$ — *i*-я подзадача формируется из СПЗ;
– $solve\_subtask_i$ — *i*-й МУ решил подзадачу;
– $recv\_subtask_i$ — *i*-й результат подзадачи МУ отправляется ЯПО;
– $res\_segment_i$ — формируется *i*-й результат СПЗ;
– $recv\_segment_i$ — результат *i*-й СПЗ отправляется в ЦУ;
– res_task_i — формируется *i*-й результат ПЗ;
– end_segment — получен конечный результат СПЗ;
– end_task — получен конечный результат ПЗ;
– free_module — МУ свободен;
– busy_module — МУ занят;
– free_core — ЯПО свободен;
– busy_core — ЯПО занят;
– empty — очередь задач пуста.

Рассмотрим математическую модель программной оболочки, построенную на основе языка LTL.

1. Всякий раз, когда пользователь собирается запустить ПЗ, ЦУ добавляет себе ПЗ в очередь задач

$$G\left(\text{try\_task}_i \rightarrow \text{add\_task}_j\right). \quad (1)$$

2. Пока очередь задач не окажется пустой, ЦУ будет отправлять задачи на решение свободным ЯПО:

$$G\left(\left(\text{free\_core} \rightarrow \text{send\_task}_i\right) \ U \ \text{empty}\right). \quad (2)$$

3. Всякий раз, когда ЦУ отправляет задачу ЯПО, формируется СПЗ для этого ЯПО:

$$G\left(\text{send\_task}_i \rightarrow \text{X create\_segment}_j\right). \quad (3)$$

4. Всякий раз, когда для ЯПО формируется СПЗ, он становится занятым:

$$G\left(\text{create\_segment}_\text{i} \rightarrow \text{busy\_core}\right). \quad (4)$$

5. Всякий раз, когда ЯПО становится занятым, когда-нибудь должен быть найден конечный результат решения СПЗ:

$$G\left(\text{busy\_core} \rightarrow F \ \text{end\_segment}\right). \quad (5)$$

6. Пока не получен конечный результат решения СПЗ, ЯПО будет отправлять СПЗ на решение свободным МУ:

$$G\left(\left(\text{free\_module} \rightarrow \text{send\_segment}_\text{i}\right) \ \rightarrow \ \text{! end\_segment}\right). \quad (6)$$

7. Всякий раз, когда ЯПО отправляет СПЗ на решение МУ, формируется подзадача для этого МУ:

$$G\left(\text{send\_segment}_\text{i} \rightarrow X \ \text{create\_subtask}_j\right). \quad (7)$$

8. Всякий раз, когда для МУ формируется подзадача, он становится занятым:

$$G\left(\text{create\_subtask}_\text{i} \rightarrow \text{busy\_module}\right). \quad (8)$$

9. Всякий раз, когда МУ становится занятым, должна когда-нибудь решиться подзадача:

$$G\left(\text{busy\_module} \rightarrow \text{F solve\_subtask}_\text{i}\right). \quad (9)$$

10. После решения подзадачи МУ возвращает результат ЯПО и становиться свободным:

$$G\left(\text{solve\_subtask}_i \rightarrow X \left(\text{recv\_subtask}_j \wedge \text{free\_module}\right)\right). \quad (10)$$

11. Всякий раз, когда ЯПО получает результат решения подзадачи от МУ, ЯПО формирует результат соответствующей СПЗ:

$$G\left(\text{recv\_subtask}_i \rightarrow X \ \text{res\_segment}_j\right). \quad (11)$$

12. Всякий раз, когда ЯПО формирует результат решения СПЗ, оболочка проверяет, получен или нет её конечный результат. Если этот результат получен, то ЯПО возвращает результат СПЗ ЦУ и становится свободным:

$$G\left(\left(\text{res\_segment}_i \rightarrow \text{end\_segment}\right) \rightarrow X\left(\text{recv\_segment}_j \rightarrow \text{free\_core}\right)\right). \quad (12)$$

13. Всякий раз, когда ЦУ получает результат решения СПЗ от ЯПО, ЦУ формирует результат соответствующей ПЗ:

$$G\left(\text{recv\_segment}_i \rightarrow X \ \text{res\_task}_j\right). \quad (13)$$

14. Всякий раз, когда ЦУ формирует результат решения ПЗ, выполняется проверка того, получен или нет конечный результат. Если этот результат получен, то ПЗ удаляется из очереди:

$$G\left(\left(\text{res\_task}_i \wedge \text{end\_task}\right) \wedge \text{del\_task}_j\right). \quad (14)$$

Полученные зависимости темпоральной логики позволяют представить псевдокод основных процессов модели (листинги 1 – 3). Для каждой операции псевдокода ставится счетчик. Следует заметить, что псевдокод для ЯПО и МУ являются инвариантными по отношению ко всем компьютерам и вычислительным устройствам соответственно:

```
        while (true) {
1.1.        if (try_task)
1.2.            add_task();
1.3.        if (!empty && free_core)
1.4.            send_task();
1.5.        if (recv_segment()) {
1.6.            res_task();
1.7.            if (end_taks)
1.8.                del_task();
            }
        }
```

Листинг 1. Псевдокод ЦУ

В соответствии с построенным псевдокодом строится размеченная система переходов LTS (Labelled Transition System), где учитываются основные состояния процессов модели:

– счетчики выполнения команд;

– состояние решения подзадачи (решено / не решено);

– состояние нахождения конечного решение СПЗ (найдено / не найдено);

– состояние ЯПО (занят / свободен);

– состояние модуля устройства (занят / свободен).

На рис. 1 изображены схемы LTS каждого отдельного процесса: единственного — для ЦУ и множества процессов ЯПО и МУ. В узлах через запятую показаны значения основных состояний процессов модели.

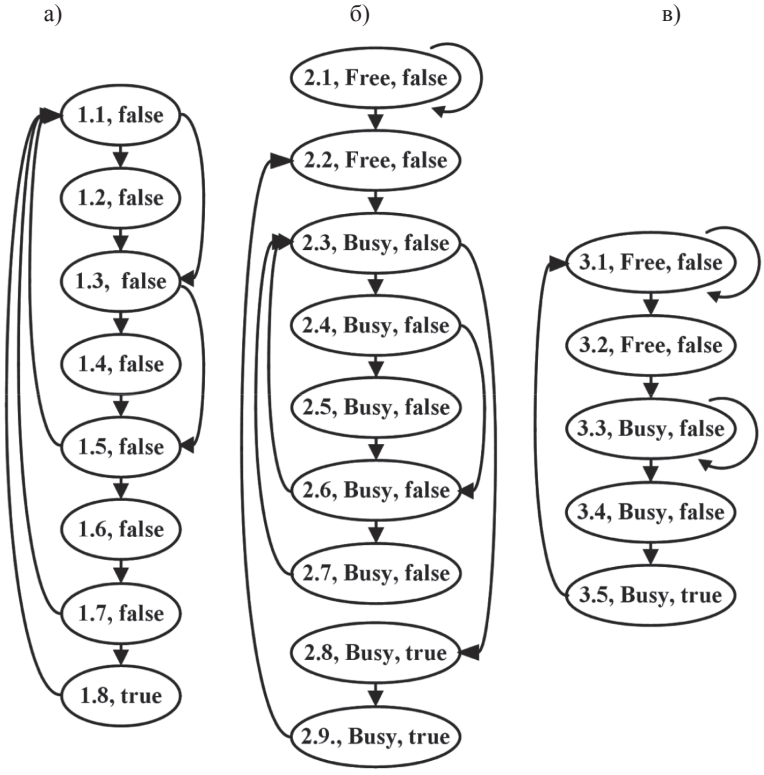


Рис. 1. LTS основных процессов модели: *а* — ЦУ; *б* — ЯПО; *в* — МУ

```
        while (true) {
2.1.        if (create_segment()) {
2.2.            status = busy_core;
2.3.            while (!end_segment) {
2.4.                if (free_module)
2.5.                    send_segment();
2.6.                if (recv_subtask())
2.7.                    res_segment();
                }
2.8.            recv_segment();
2.9.            status = free_core;
            }
        }
```

Листинг 2. Псевдокод ЯПО

```
        while (true) {
3.1.        if (create_subtask()) {
3.2.            status = busy_module;
3.3.            while (!solve_subtask) {}
3.4.            recv_subtask();
3.5.            status = free_module;
            }
        }
```

Листинг 3. Псевдокод МУ

Поскольку программная реализация должна обеспечивать работу со многими процессами МУ и ЯПО, рассмотрим LTS-схемы демонстрирующие динамику взаимодействия двух процессов МУ и одного процесса ЯПО (рис. 2), а также двух процессов ЯПО и одного процесса ЦУ (рис. 3).

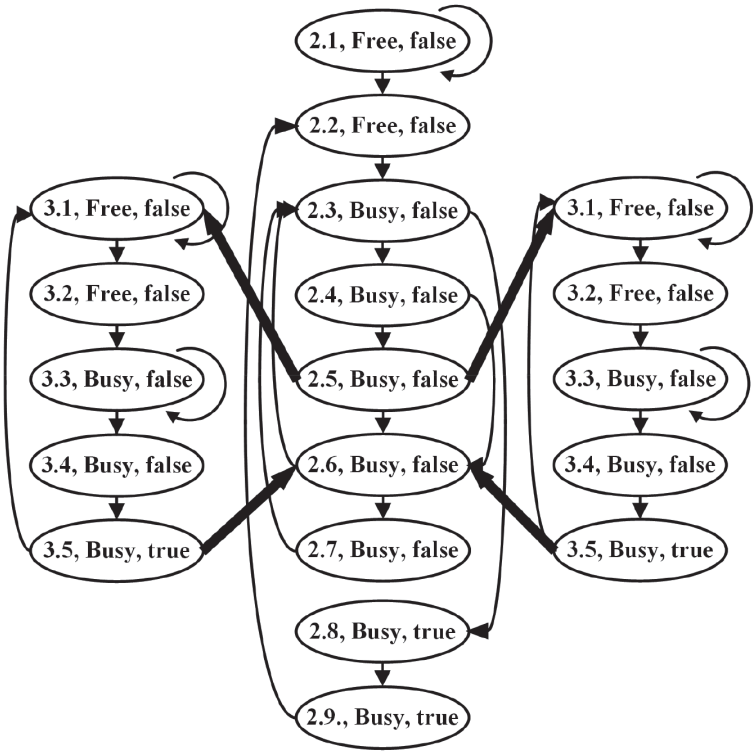


Рис. 2. LTS взаимодействия процесса ЯПО с двумя процессами МУ

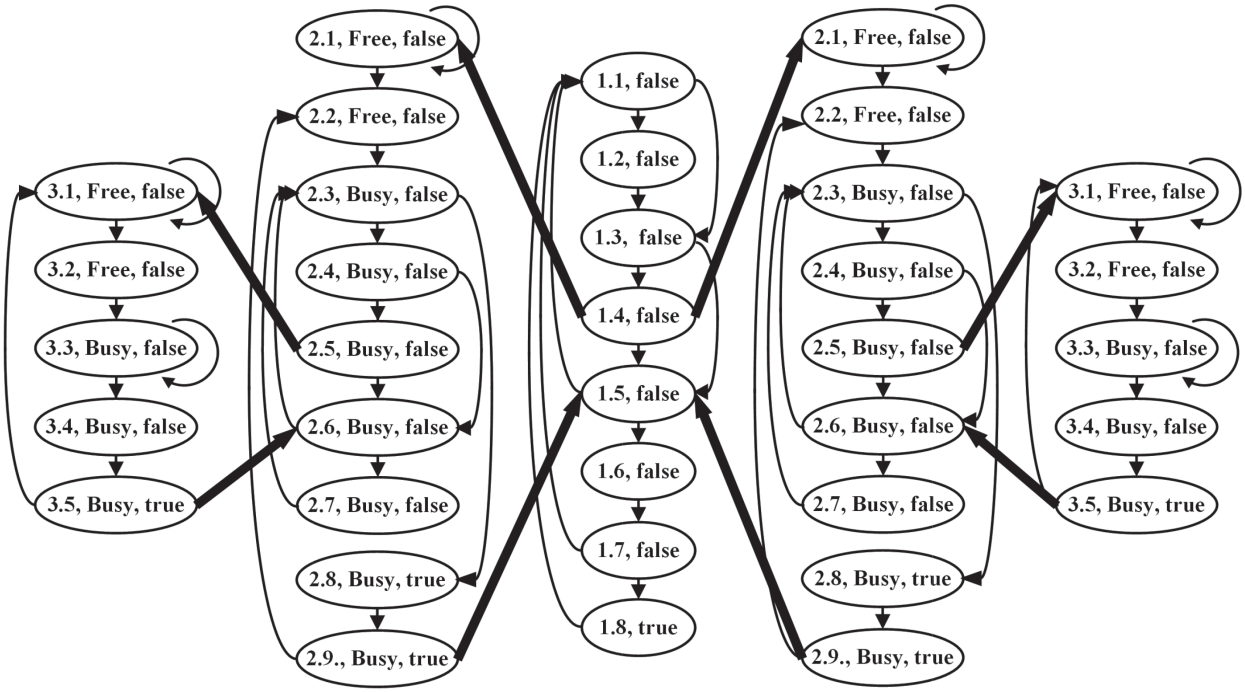


Рис. 3. LTS взаимодействия процесса ЦУ с двумя процессами ЯПО, работающих с одним процессом МУ

ЯПО управляет работой процессов МУ, выполняемых параллельно. Взаимодействие МУ и ЯПО, осуществляемое во временные отметки отправки (блок состояния ЯПО — «2.5, Busy, false») и получения (блок состояния ЯПО — «2.6, Busty, false») результата решения подзадачи МУ, должно быть синхронизировано. На схеме синхронизация процессов показана жирными линиями.

ЦУ аналогичным образом управляет работой процессов ЯПО, выполняемых параллельно. Взаимодействие ЯПО и ЦУ, осуществляемое во временные отметки отправки (блок состояния ЦУ — «1.4, false») и получения (блок состояния ЦУ — «1.5, false») результата решения подзадачи СПЗ, также должно быть синхронизировано.

Выводы

Использование технологий распределённой обработки данных для повышения производительности ПОР за счёт их объединения в единый вычислительный кластер при автоматизированной диспетчеризации судопропуска ШСК даёт следующие преимущества. Во-первых, позволяет реализовывать аппаратно-программный комплекс любой вычислительной мощности, требуемый уровень которой определяется параметрами судоходного канала, и при необходимости наращивать её в процессе эксплуатации, во-вторых, повышает отказоустойчивость системы, что является важным фактором при функционировании такого рода объектов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Егоров А. Н.* Распараллеливание вычислений для оптимизации оперативного управления транспортным конвейером шлюзованной системы / А. Н. Егоров, В. А. Кузнецов // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2016. — № 2 (36). — С. 214–224. DOI: 10.21821/2309-5180-2016-8-2-214-224.

2. *Алпатов А. Н.* Развитие распределенных технологий и систем / А. Н. Алпатов // Перспективы Науки и Образования. — 2015. — № 2 (14). — С. 60–66.

3. In search of clusters. — Second edition. — Upper Saddle River: Prentice Hall, 1998. — 578 p.

4. *Камерон Х.* Параллельное и распределенное программирование с использованием C++ / Х. Камерон, Х. Трейси. — М: Вильямс, 2004 — 672 с.

5. *Сухорослов О. В.* Организация вычислений в гетерогенных распределенных средах / О. В. Сухорослов // Известия ЮФУ. Технические науки. — 2016. — № 12 (185). — С. 115–130. DOI: 10.18522/2311-3103-2016-12-115130.

6. *Truonga H.-L.* Towards the Realization of Multi-dimensional Elasticity for Distributed Cloud Systems / H.-L. Truonga, S. Dustdara, F. Leymann // Procedia Computer Science. — 2016. — Vol. 97. — Pp. 14–23. DOI: 10.1016/j.procs.2016.08.276.

7. *Цветков В. Я.* Проблемы распределенных систем / В. Я. Цветков, А. Н. Алпатов // Перспективы Науки и Образования. — 2014. — № 6 (12). — С. 31–36.

8. *Metaweia M. A.* Load balancing in distributed multi-agent computing systems / M. A. Metaweia, S. A. Ghoneim, S. M. Haggag, S. M. Nassar // Ain Shams Engineering Journal. — 2012. — Vol. 3. — Is. 3. — Pp. 237–249. DOI: 10.1016/j.asej.2012.03.001.

9. *Daryapurkar A.* Efficient Load Balancing Algorithm in Cloud Environment / A. Daryapurkar, M. V. M. Deshmukh // International Journal Of Computer Science And Applications. — 2013. — Vol. 6. — No. 2. — Pp. 308–312.

10. *Олзоева С. И.* Оптимальная балансировка нагрузки в GRID-системах / С. И. Олзоева, В. Ц. Мархоев, А. Г. Олзоева // Вестник Бурятского государственного университета. — 2012. —№ SB. — С. 220–223.

REFERENCES

1. Yegorov, Alexander Nikolayevich, and Vitaliy Aleksandrovich Kuznetsov. “Parallel computing for optimization of operational management of the transport conveyor of lock system.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova* 2(36) (2016): 214–224. DOI: 10.21821/2309-5180-2016-8-2-214-224.

2. Alpatov, Aleksei Nikolaevich. “The development of distributed technologies and systems.” *Perspectives of Science and Education* 2(14) (2015): 60–66.

3. *In search of clusters.* Second edition. Upper Saddle River: Prentice Hall, 1998.

4. Kameron, Kh., and Kh. Treisi. *Parallel’noe i raspredelennoe programmirovanie s ispol’zovaniem C++.* M: Vil’yams, 2004.

5. Sukhoroslov, Oleg Viktorovich. “Organization of computations in heterogenous distributed environments.” *Izvestiya SFedU. Engineering Sciences* 12(185) (2016): 115–130. DOI: 10.18522/2311-3103-2016-12-115130.

6. Truonga, Hong-Linh, Schahram Dustdar, and Frank Leymann. “Towards the Realization of Multi-dimensional Elasticity for Distributed Cloud Systems”. *Procedia Computer Science* 97 (2016): 14–23. DOI: 10.1016/j.procs.2016.08.276.

7. Tsvetkov, Viktor Yakovlevich, and Aleksei Nikolaevich Alpatov. “Problems of distributed systems.” *Perspectives of Science and Education* 6(12) (2014): 31–36.

8. Metaweia, Maha A., Salma A. Ghoneima, Sahar M. Haggaga, and Salwa M. Nassar. “Load balancing in distributed multi-agent computing systems.” *Ain Shams Engineering Journal* 3.3 (2012): 237–249. DOI: 10.1016/j.asej.2012.03.001.

9. Daryapurkar, A., A. Daryapurkar, and M. V. M. Deshmukh. “Efficient Load Balancing Algorithm in Cloud Environment.” *International Journal Of Computer Science And Applications* 6.2 (2013): 308–312.

10. Olzoeva, Seseg Ivanovna, Vitaliy Tsydenovich Markhoev, and Ayuna Gennadevna Olzoeva. “The optimal load balancing in GRID systems.” *Vestnik Buryatskogo gosudarstvennogo universiteta* SB (2012): 220–223.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Кузнецов Виталий Александрович — аспирант
Научный руководитель:
Егоров Александр Николаевич.
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени
адмирала С. О. Макарова»
198035, Российская Федерация, Санкт-Петербург,
ул. Двинская, 5/7
e-mail: *kuznecov.v.spb@mail.ru, kaf_vsi@gumrf.ru*

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Kuznetsov, Vitaliy A. — Postgraduate.
Supervisor:
Yegorov, Alexander N.
Admiral Makarov State University of Maritime
and Inland Shipping
5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg, 198035,
Russian Federation
e-mail: *kuznecov.v.spb@mail.ru, kaf_vsi@gumrf.ru*

Статья поступила в редакцию 6 июля 2017 г.
Received: July 6, 2017.

Научное периодическое издание

Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова

Том 9. № 4

2017 год

Выпускающие редакторы
Н. А. Карамзина, Т. В. Середова
Дизайн и верстка *М. Н. Евсюткина*
Технический редактор *Е. И. Тюленева*

Подписано в печать с оригинал-макета 28.08.17. Формат 60×90/8
Гарнитура Times New Roman. Усл. печ. л. 28,5. Тираж 500 экз. Заказ № 445/2017

Государственный университет морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова
198035, Санкт-Петербург, ул. Двинская, 5/7