

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

ВЕСТНИК

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

Том 10. № 4

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

САНКТ-ПЕТЕРБУРГ
2018

Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — СПб.: ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова, 2018. — Т. 10. — № 4. — 230 с.

ISSN (print) 2309-5180

ISSN (online) 2500-0551

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

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

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

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

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



ISSN 2309-5180



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

СОДЕРЖАНИЕ

ЭКСПЛУАТАЦИЯ ВОДНОГО ТРАНСПОРТА, СУДОВОЖДЕНИЕ ... 665

Дерябин В. В. Использование нейронных сетей для стабилизации судна на траектории 665

Изотов О. А., Гультяев А. В. Определение требуемого количества технологических ресурсов портов и грузовых терминалов методом имитационного моделирования 679

Смоленцев С. В., Сазонов А. Е., Искандеров Ю. М. Кооперативное маневрирование безэкипажных судов для безопасного расхождения в море 687

Логиновский В. А. Закон Хайнриха: расширение матрицы оценки риска в области человеческого фактора 696

Ольховик Е. О. Исследование изменения скорости крупнотоннажных судов в ледовых условиях акватории Северного морского пути 705

Валькова С. С. Оценка параметров склада морского порта методами имитационного моделирования 713

ВОДНЫЕ ПУТИ СООБЩЕНИЯ И ГИДРОГРАФИЯ 724

Каюда В. А., Колосов М. А. Анализ перемещений и деформаций стен судоходного шлюза 724

Зинченко А. Г., Фирсов Ю. Г. Геоморфология дна Северного Ледовитого океана в контексте Конвенции ООН по морскому праву 1982 года 734

Цуприк В. Г., Афонин А. Б., Гарибин П. А. Подготовка инженерных кадров для развития водных путей при освоении арктических регионов 752

СУДОСТРОЕНИЕ И СУДОРЕМОНТ 762

Благовидова И. Л. Определение ледовых нагрузок при проектировании самоподъемных плавучих буровых установок 762

СУДОВЫЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ УСТАНОВКИ, СИСТЕМЫ И УСТРОЙСТВА 770

Леонов В. Е., Сердюк А. Д. Исследование и разработка эффективной технологии защиты воздушного бассейна при эксплуатации судов 770

Столяров С. П., Гаврилов В. В., Мащенко В. Ю. Использование нефти в качестве топлива для дизель-генераторов, работающих в условиях нефтепромыслов 783

Пьяе П. А. Анализ способов снижения содержания соединений серы в выпускных газах судовых двигателей 793

Кучеров В. Н. Анализ корректности программ тренажёров DIESELSIM DPS 100-GFCA, DPS 100 L-MS и построение ограничительных характеристик по тепловой напряжённости дизелей 804

Том 10. № 4

2018

РЕДАКЦИОННЫЙ СОВЕТ

Гл. редактор

С. О. Барышников,

д.т.н., проф.

rector@gumrf.ru

Зам. гл. редактора

А. П. Нырклов,

д.т.н., проф.

NyrklovAP@gumrf.ru

С. Гуцма —

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

Г. В. Егоров —

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

Ф. В. Кармазинов —

координатор стратегических программ ГУП «Водоканал СПб», д.т.н., проф.

Р. Качиньски —

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

А. И. Пошивай —

заместитель руководителя Федерального агентства морского и речного транспорта

А. Е. Сазонов —

д.т.н., проф., чл.-кор. РАН

Р. М. Юсупов —

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

РЕДАКЦИЯ:

E-mail: journal@gumrf.ru

http://journal.gumrf.ru

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

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

Подписной индекс в каталоге Роспечать — 37276.

Все материалы, поступившие в редакцию, рецензируются.

**Члены
редколлегии:**

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

ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ КОМПЛЕКСЫ И СИСТЕМЫ..... 818

Труднев С. Ю., Шуваева А. О. Исследование работы импульсного стабилизатора напряжения для питания катодной защиты морских платформ 818
Румянцев А. Ю. Моделирование системы энергоэффективного управления гребной электрической установкой с униполярными машинами 828
Белоусов И. В., Самосейко В. Ф. Комбинированная оптимальная широтно-импульсная модуляция по критерию дисперсии тока в гребных электроприводах 841

**ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И АВТОМАТИЗАЦИЯ
НА ТРАНСПОРТЕ 857**

Ивакин Я. А., Потапычев С. Н. Интеллектуальная поддержка принятия решений при диспетчеризации геопространственных процессов морского транспорта 857
Васин А. В., Каретников В. В., Меншиков А. И. К вопросу создания телекоммуникационной автоматизированной системы организации движения на внутренних водных путях 870
Голоскоков К. П., Чиркова М. Ю. Структурный подход к повышению надежности программного обеспечения информационных систем 880

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

Deputy Editor-in-Chief

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

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

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

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

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

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

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

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

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

OPERATION OF WATER TRANSPORT, NAVIGATION 665

Deryabin V. V. Neural networks implementation for a vessel track control 665

Izotov O. A., Gulyaev A. V. Determination of the required quantity of technological resources of ports and cargo terminals by the method of imitation modeling 679

Smolentsev S. V., Sazonov A. E., Iskanderov Yu. M. Cooperative maneuvering of unmanned ships for collision avoidance at sea 687

Loginovskiy V. A. Heinrich's law: expansion of risk assessment matrix into human factor area 696

Ol'khovik E. O. Research the change of ship's speed with large-capacity in ice conditions on area of the Northern Sea Route 705

Valkova S. S. Simulation for the evaluation of the sea port storage's parameters 713

WATERWAYS AND HYDROGRAPHY 724

Kaiuda V. A., Kolosov M. A. Analysis of displacements and deformations of shipping shutter walls 724

Zinchenko A. G., Firsov Yu. G. Geomorphology of the Arctic ocean in the context of The United Nations Convension on the law of the sea 1982 734

Tsuprik V. G., Afonin A. B., Garibin P. A. Training of engineering personnel for development of Arctic's regions waterways 752

SHIPBUILDING AND SHIP REPAIR 762

Blagovidova I. L. Determination of ice loads in designing self-elevating drilling units 762

SHIP POWER PLANTS, SYSTEMS AND DEVICES 770

Leonov V. Ye., Serdyuk A. D. Research and development of effective technology for air basin protection while ship operation 770

Stolyarov S. P., Gavrilov V. V., Maschenko V. Y. The use of fuel oil for diesel-generator working in oil fields 783

Pyae P. A. Analysis of the methods for reducing the sulphur contents in the exhaust gases of ship's engines 793

Kuchеров V. N. Analysis correctitude simulators programs of DIESELSIM DPS 100-GFCA, DPS 100 L-MC and calculating heat load limit characteristic for this engines 804

ELECTRICAL EQUIPMENT AND SYSTEMS 818

Trudnev S. Yu., Shuvaeva A. O. The investigation of operation pulse voltage regulator for supplying cathodic protection of offshore rigs 818

**Editorial
Collegium:**

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

Rumyantsev A. Yu. Modeling of the system of energy efficient control
of the electrical propulsion installation with homopolar machines 828
Belousov I. V., Samosejko V. F. Combined optimal pulse width
modulation according to the criterion of variance of current
in propulsion electrical installations of ships..... 841

**INFORMATION TECHNOLOGY AND AUTOMATION
IN TRANSPORT..... 857**

Ivakin Y. A., Potapichev S. N. Decision-making intelligent support
at dispatching geospatial processes of marine transport..... 857
Vasin A. V., Karetnikov V. V., Menshikov A. I. Creation of automated
telecommunication traffic routing system on inland waterways..... 870
Goloskokov K. P., Chirkova M. Yu. Structural approach to improving
the reliability of the software of information systems 880

ЭКСПЛУАТАЦИЯ ВОДНОГО ТРАНСПОРТА, СУДОВОЖДЕНИЕ

DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-4-665-678

NEURAL NETWORKS IMPLEMENTATION FOR A VESSEL TRACK CONTROL

V. V. Deryabin

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

A vessel's neural networks based model is proposed for predictive track control. Predicting model consists from three neural networks, interconnected with blocks of summing, multiplying and tap delaying. First neural network takes as input vector variables, which determine a vessel dynamics at three consequent moments of time, which is supposed to be discrete. The network predicts longitudinal, transverse velocities through water and heading of a vessel for the third more recent moment of time. Second net takes as input signal values of output of the first network, taken at two consequent moments of time. The network predicts integrals from northern and eastern components of relative speed vector at the interval between the above moments of time. Third neural network takes as input variables geodetic latitude and longitude of a ship, parameters of a reference route. Output vector of the network is a regulation error that is current deviation of a vessel's centre of gravity from reference route. This deviation is calculated into the shortest (orthogonal) direction. Each of the networks has two layers. Neurons of the first layer have continuous bounded monotonically increasing nonlinear activation functions. Neurons of the second layer have identical activation functions. Neurons of the first layer only have biases units. Neural networks based predicting model have been generated with MATLAB software. It has view of a neural net with a custom architecture, which cannot be considered as a network of known type. Such net has 16 layers. There are connections with inputs for more than one layer. Realization of training procedure for this network has been checked.

Keywords: vessel's route, adaptive control, predicting model, neural network, universal approximation.

For citation:

Deryabin, Victor V. "Neural networks implementation for a vessel track control." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 10.4 (2018): 665–678. DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-4-665-678.

УДК 656.61.052:629.4.076:004.032.26

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ ДЛЯ СТАБИЛИЗАЦИИ СУДНА НА ТРАЕКТОРИИ

В. В. Дерябин

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

Предлагается построение прогнозирующей модели для стабилизации судна на траектории на основе нейронных сетей. Прогнозирующая модель состоит из трёх нейронных сетей, связанных между собой блоками суммирования, умножения и операциями единичных задержек. Первая нейронная сеть принимает на вход вектор величин, определяющих динамику судна в три последовательных момента дискретного времени, и прогнозирует продольную и поперечную относительную скорость судна, а также его курс на более поздний третий момент времени. Вторая нейронная сеть принимает на вход значения выхода первой сети, взятые в два последовательных момента времени, и прогнозирует значения интегралов от северной и восточной составляющих относительной скорости, взятых по времени на промежутке между указанными моментами. Третья нейронная сеть принимает на вход геодезические широту и долготу судна, параметры заданного маршрута. На выходе сети получается ошибка регулирования, т. е. текущее отклонение центра тяжести судна от заданной траектории, рассчитанное в кратчайшем (перпендикулярном) направлении. Каждая из сетей содержит два слоя. Нейроны первого слоя имеют непрерывные ограни-

ченные монотонно возрастающие нелинейные функции активации. Нейроны второго слоя имеют тождественные функции активации. Только нейроны первого слоя имеют пороговые смещения. Нейросетевая прогнозирующая модель была реализована в среде MATLAB в виде единой нейронной сети произвольной структуры, которую нельзя отнести к известным типам. Такая сеть имеет 16 слоёв, и связь с входом существует не только для нейронов первого слоя. Проверена возможность обучения такой сети.

Ключевые слова: траектория судна, адаптивное управление, прогнозирующая модель, нейронная сеть, универсальная аппроксимация.

Для цитирования:

Дерябин В. В. Использование нейронных сетей для стабилизации судна на траектории / В. В. Дерябин // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2018. — Т. 10. — № 4. — С. 665–678. DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-4-665-678.

Введение (Introduction)

Задача удержания судна на заданной траектории является стандартной штурманской задачей, решаемой в процессе выполнения навигационной составляющей рейса судна. С появлением авторулевых возникла возможность автоматизированного или полностью автоматического варианта решения данной задачи. Вопросы автоматической стабилизации судна на траектории достаточно хорошо изучены с точки зрения оптимального управления, что подтверждают исследования [1] – [5]. Тема адаптивного управления судном по траектории разработана не так полно. В последнее время появилось достаточно много исследований, в которых предлагается адаптивный вариант траекторной стабилизации судна на основе нейронных сетей. Например, в источнике [6] предлагается использование двухслойной сети прямого распространения, которая обучается работе контроллера, обеспечивающего стабилизацию судна вдоль траектории на основе дифференциальных уравнений его движения (Sliding Mode Controller). В работе [7] радиальная базисная функция используется для моделирования неопределённости в алгоритме управления движением по поверхности (Dynamic Surface Control — DSC). В статье [8] рекуррентная двухслойная нейронная сеть используется совместно с ПИД-регулятором, прогнозируя скорость поворота судна. Отличительной особенностью указанных ранее и многих других моделей адаптивного управления является то, что нейронная сеть выполняет обычно если не вспомогательную, то, во всяком случае, не полностью самостоятельную функцию по определению угла перекаладки руля. В связи с этим имеет смысл обратиться к использованию нейронных сетей в качестве основы построения прогнозирующей модели судна как объекта управления.

Технология адаптивного управления на основе нейронных сетей в настоящее время хорошо известна [9], [10]. В качестве прогнозирующей модели судна могут использоваться также обыкновенные дифференциальные (разностные) уравнения [11]. Преимущества нейронных сетей перед аппаратом обыкновенных дифференциальных уравнений заключаются в следующем: во-первых, нейронные сети обладают универсальными аппроксимирующими свойствами, что, в общем случае, несправедливо для дифференциальных уравнений, традиционно используемых для моделирования движения судна; во-вторых, нейросетевая архитектура позволяет организовать быстрый поиск оптимального набора углов перекаладки руля на горизонте управления, что особенно актуально при использовании модели в режиме реального времени.

Методы и материалы (Methods and Materials)

Прогнозирующая модель в задаче адаптивного управления. Пусть управляемая (выходная), в общем случае, векторная величина Y для объекта управления (ОУ) рассматривается как непрерывная функция времени: $Y(t) = A(U(t), F(t))$, где $U(t), F(t)$ — вектора управляющих и возмущающих воздействий, каждая составляющая которых непрерывно зависит от времени; A — нелинейный оператор. Под прогнозирующей моделью будем понимать алгоритм, который позволяет спрогнозировать значение $Y(t)$ на промежутке будущего времени $(t_0; t_1]$, где t_0 — текущий момент времени; t_1 — произвольный момент будущего времени, если известны $U(t), F(t)$ на промежутке $(t_{-1}; t_1]$, где $0 \leq t_{-1} \leq t_0$.

Прогнозирующая модель устанавливает взаимосвязь между выходом $Y(t)$ и управлением $U(t)$, рассматриваемыми на интервале будущего времени $(t_0; t_1]$. Указанное обстоятельство позволяет, выбрав функционал качества управления $J = J(Y(t), U(t))$ и целевое условие для него, рассмотреть задачу обеспечения целевого условия как задачу оптимизации в пространстве компонент вектора управляющих воздействий $U(t)$. Как правило, в качестве целевого условия выбирается минимизация функционала J на отрезке $(t_0; t_1]$. В качестве алгоритма прогнозирующей модели могут выступать, например, системы обыкновенных дифференциальных (разностных) уравнений, модели авторегрессии, нейронные сети.

Конкретизируем понятие прогнозирующей модели для случая дискретного времени. Пусть t_1, t_2, \dots, t_n — последовательность, состоящая из n моментов времени, разделенных промежутком времени Δt . Пусть $\{U(t_i)\}_{i=1:n} = U(t_1), U(t_2), \dots, U(t_n)$ — временная последовательность значений вектора управлений; $\{F(t_i)\}_{i=1:n} = F(t_1), F(t_2), \dots, F(t_n)$ — последовательность вектора возмущений; $\{Y(t_i)\}_{i=1:n} = Y(t_1), Y(t_2), \dots, Y(t_n)$ — последовательность управляемой величины. Прогнозирующей моделью дискретного времени будем называть алгоритм, который позволяет однозначно определить значение управляемой величины на шаг вперед: $Y(t_{n+1})$, если известны последовательности управлений $\{U(t_i)\}_{i=1:n}$ и возмущений $\{F(t_i)\}_{i=1:n}$, а также выходного вектора $\{Y(t_i)\}_{i=1:n}$.

Нейронная сеть как дискретная прогнозирующая модель стабилизации судна на траектории. При решении задачи стабилизации судна на траектории в качестве регулируемой величины Y выступает e_{\perp} — отклонение от заданной траектории (маршрута) в перпендикулярном (кратчайшем) направлении. На поверхности эллипсоида указанное отклонение определяется следующим образом:

$$Y = e_{\perp} = h(\varphi, \lambda, Q), \quad (1)$$

где φ — геодезическая широта центра тяжести судна G ; λ — его геодезическая долгота; $Q = (q_1, q_2, \dots, q_m)$ — вектор m параметров заданной траектории движения судна; h — некоторая функция, определяющая алгоритм вычисления e_{\perp} .

На основе анализа соотношения (1) становится понятным, что для получения значения ошибки регулирования на шаг вперед, т. е. величины $e_{\perp}(t_{n+1})$, необходимо спрогнозировать координаты на шаг вперед, т. е. найти величины $\varphi(t_{n+1}), \lambda(t_{n+1})$. Таким образом, сначала необходимо смоделировать зависимость вида

$$Y(t_{n+1}) = e_{\perp}(t_{n+1}) = h(\varphi(t_{n+1}), \lambda(t_{n+1}), Q), \quad (2)$$

т. е. решить задачу аппроксимации функции многих переменных, для чего достаточно использовать нейронную сеть, удовлетворяющую условиям теоремы об универсальной аппроксимации [12]. Такая сеть содержит два слоя. Первый слой содержит нейроны с нелинейными монотонно возрастающими непрерывными и ограниченными функциями активации, второй — один нейрон с тождественной функцией активации. Будем называть в дальнейшем данную нейронную сеть *НС «Ошибка»*. Входной сигнал сети имеет вид $X_{\text{error}} = (\varphi(t_{n+1}), \lambda(t_{n+1}), Q)^T$. Общий вид архитектуры представлен на рис. 1.

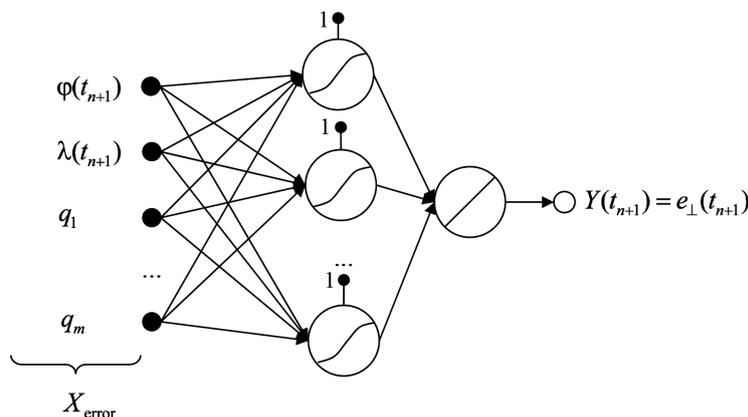


Рис. 1. Архитектура нейронной сети *НС «Ошибка»*

После определения структуры сети, прогнозирующей ошибку регулирования на шаг вперёд, в соответствии с выражением (2), возникает закономерный вопрос о прогнозе геодезических координат судна: $\varphi(t_{n+1})$, $\lambda(t_{n+1})$.

Дифференциальные уравнения координат имеют следующий вид:

$$\begin{aligned} \frac{d\varphi}{dt} &= \frac{V_N}{M}; \\ \frac{d\lambda}{dt} &= \frac{V_E}{N \cos \varphi}, \end{aligned} \quad (3)$$

где M, N — главные радиусы кривизны, зависящие, как известно, от широты φ .

Интегрируя соотношения (3) на промежутке времени $[t_n; t_{n+1}]$ и вынося за знак интеграла величины, обратные радиусу кривизны меридиана и параллели (строго говоря, неявно зависящие от времени), получим следующие приближённые соотношения:

$$\begin{aligned} \varphi(t_{n+1}) &\approx \varphi(t_n) + (1/M_n) \int_{t_n}^{t_{n+1}} V_N(t) dt; \\ \lambda(t_{n+1}) &\approx \lambda(t_n) + (1/N_n \cos \varphi(t_n)) \int_{t_n}^{t_{n+1}} V_E(t) dt, \end{aligned} \quad (4)$$

где M_n, N_n — значения, которые принимают главные радиусы кривизны в момент времени t_n .

Данные соотношения реализуются двумя узлами суммирования, на входы которых поступают слагаемые в соотношениях (4). При этом перед суммированием интегралы умножаются на постоянные весовые коэффициенты $(1/M_n)$ и $(1/N_n \cos \varphi(t_n))$. Схема блоков суммирования и умножения представлена на рис. 2.

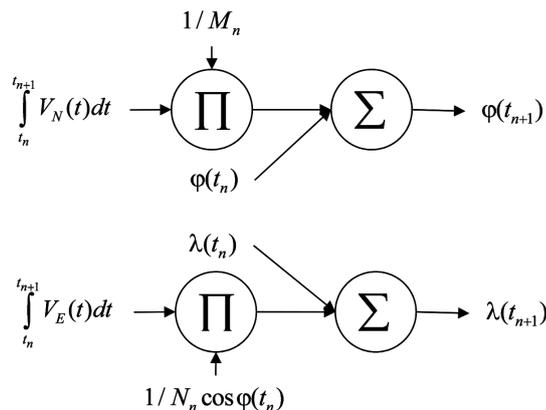


Рис. 2. Узлы суммирования и умножения для расчёта координат: общий вид

Значения интегралов $\int_{t_n}^{t_{n+1}} V_N(t) dt$ и $\int_{t_n}^{t_{n+1}} V_E(t) dt$ однозначно определяются видом подынтегральных функций на отрезке времени $[t_n; t_{n+1}]$. Данные функции, в свою очередь, определяются следующими соотношениями:

$$\begin{aligned} V_N &= V_x \cos K - V_y \sin K + V_T \cos K_T; \\ V_E &= V_x \sin K + V_y \cos K + V_T \sin K_T, \end{aligned} \quad (5)$$

где V_x, V_y — продольная и поперечная составляющие относительной скорости судна; K — истинный курс судна.

С учётом соотношений (5) упомянутые интегралы могут быть записаны в виде:

$$\begin{aligned} \int_{t_n}^{t_{n+1}} V_N(t) dt &= \int_{t_n}^{t_{n+1}} (V_x \cos K - V_y \sin K) dt + \int_{t_n}^{t_{n+1}} V_T \cos K_T dt; \\ \int_{t_n}^{t_{n+1}} V_E(t) dt &= \int_{t_n}^{t_{n+1}} (V_x \sin K + V_y \cos K) dt + \int_{t_n}^{t_{n+1}} V_T \sin K_T dt. \end{aligned} \quad (6)$$

Первые слагаемые в соотношениях (6), формирующие вектор Y_{cin} , могут быть спрогнозированы при помощи двухслойной нейронной сети, на вход которой поступает вектор $X_{cin} = (V_x(t_n), V_y(t_n), K(t_n), V_x(t_{n+1}), V_y(t_{n+1}), K(t_{n+1}))^T$. Будем называть такую сеть *НС «Кинематика»*. Её общий вид представлен на рис. 3.

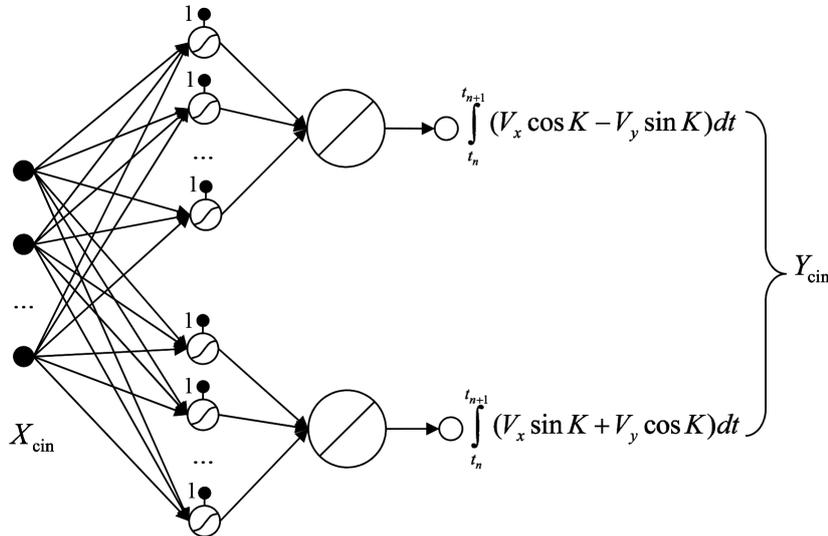


Рис. 3. Архитектура нейронной сети *НС «Кинематика»*

Непосредственно для получения интегралов, стоящих в левой части соотношения (6), необходимо к выходу *НС «Кинематика»* прибавить интегралы от составляющих течения, что можно сделать, используя обычные сумматоры (рис. 4).

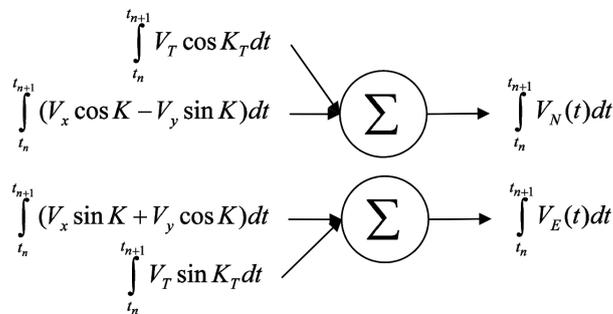


Рис. 4. Узлы суммирования выхода *НС «Кинематика»* и интегралов от составляющих скорости течения: общий вид

Остаётся теперь решить задачу прогноза на шаг вперёд составляющих скорости и курса. В соответствии с принципом кинестатики, уравнения движения судна могут быть записаны в виде:

$$\begin{aligned} F_x &= 0; \\ F_y &= 0; \\ M_z &= 0, \end{aligned} \tag{7}$$

где F_x, F_y — проекции суммарного (главного) вектора сил, включая силы инерции, на оси подвижной системы координат (Gx направлена в сторону носа, Gy — в сторону правого борта); M_z — проекция главного момента, включая момент силы инерции, сил на вертикальную ось Gz (направлена вниз).

Рассмотрим более подробно структуру сил и момента, действующих на судно. Запишем силы и момент, содержащиеся в левых частях выражений (7), в виде:

$$\begin{aligned} F_x &= F_x^c + F_x^{in} + F_x^v + F_x^P + F_x^R + F_x^A + F_x^W; \\ F_y &= F_y^c + F_y^{in} + F_y^v + F_y^P + F_y^R + F_y^A + F_y^W; \\ M_z &= M_z^c + M_z^{in} + M_z^v + M_z^P + M_z^R + M_z^A + M_z^W, \end{aligned} \quad (8)$$

где верхние индексы при слагаемых обозначают силы и момент следующим образом: *c* — центробежные; *in* — инерционной природы; *v* — неинерционной природы; *P* — со стороны движителя (например, винта); *R* — со стороны руля; *A* — аэродинамические; *W* — со стороны набегающих волн.

Центробежные силы и момент определяются следующим образом [4]:

$$\begin{aligned} F_x^c &= mV_y\omega; \\ F_y^c &= -mV_x\omega; \\ M_z^c &= 0, \end{aligned}$$

где *m* — масса судна; $\omega = \frac{dK}{dt}$ — угловая скорость поворота судна.

Силы и момент инерционной природы (при условии пренебрежения асимметрией судна относительно плоскости *Gyz*) определяются следующими выражениями [13]:

$$\begin{aligned} F_x^{in} &= -(m + \lambda_{11})\dot{V}_x + (m + \lambda_{22})V_y\omega; \\ F_y^{in} &= -(m + \lambda_{22})\dot{V}_y - (m + \lambda_{11})V_x\omega; \\ M_z^{in} &= -(J_z + \lambda_{66})\dot{\omega} + (\lambda_{11} - \lambda_{22})V_xV_y. \end{aligned}$$

где *J_z* — момент инерции относительно оси *Gz*; λ_{11} , λ_{22} — присоединённые массы судна; λ_{66} — присоединённый момент инерции относительно оси *Gz*.

Силы и момент неинерционной природы содержат, как известно, две составляющие — позиционные и вращательные. Первые зависят от угла дрейфа и относительной скорости судна, т. е. являются функциями *V_x*, *V_y*, вторые — от скорости поворота ω и относительной скорости. Причём вращательными воздействиями для продольной оси можно пренебречь. Таким образом, приходим к выводу, что

$$\begin{aligned} F_x^v &= F_x^v(V_x, V_y); \\ F_y^v &= F_y^v(V_x, V_y, \omega); \\ M_z^v &= M_z^v(V_x, V_y, \omega). \end{aligned}$$

Силовые воздействия со стороны винтового движителя определяются следующими соотношениями [13], [14]:

$$\begin{aligned} F_x^P &= k_1\rho n^2 D^4; \\ F_y^P &= \rho n^2 D^4 \left[2k_{q0} - J_p (dk_{q0} / dJ_p) \right] J_p \operatorname{tg} \chi \beta_k; \\ M_z^P &= -F_y^P l_K, \end{aligned} \quad (9)$$

где *k₁* — коэффициент упора винта; ρ — плотность воды; *D* — диаметр винта; *n* — число оборотов (частота вращения) винта; *k_{q0}* — коэффициент момента винта на валу в швартовном режиме; *J_p* — относительная поступь; χ — коэффициент скоса потока; β_k — местный угол дрейфа; *l_K* — расстояние от центра тяжести судна до места установки винта.

Коэффициент упора винта зависит от относительной поступи $k_1 = k_1(J_p)$, которая, в свою очередь, определяется соотношением $J_p = (1 - \psi_p)V_x / (nD)$, где Ψ_p — коэффициент попутного потока. Известно также, что в случае косоугольного потока составляющая F_x^P будет изменяться по сравнению с её значением при осевом натекании [15]. Это происходит в том числе и потому, что Ψ_p зависит от местного угла дрейфа β_k . Местный же угол дрейфа рассчитывается по следующей формуле:

$$\beta_k = -\arcsin \left(\frac{V_y - l_K \omega}{\sqrt{(V_y - l_K \omega)^2 + V_x^2}} \right), \text{ и получается, что тяга } F_x^P \text{ зависит также и от величин } V_y, \omega.$$

На основе соотношений (9) и вышеприведённых рассуждений можно прийти к выводу о том, что боковая сила винта F_y^P будет зависеть от четырёх величин: V_x , V_y , ω , n . Однако при практических расчётах управляемости учитывается только её момент [13]. Таким образом, получим следующие зависимости:

$$\begin{aligned} F_x^P &= F_x^P(V_x, V_y, \omega, n); \\ F_y^P &\approx 0; \\ M_z^P &= M_z^P(V_x, V_y, \omega, n). \end{aligned}$$

Силы и моменты, воздействующие на корпус судна со стороны руля, записываются следующим образом [13]:

$$\begin{aligned} F_x^R &= C_{XR}(\rho/2)(V_x^2 + V_y^2)A_{RE}; \\ F_y^R &= C_{YR}(\rho/2)(V_x^2 + V_y^2)A_{RE}; \\ M_z^R &= F_y^R l_R, \end{aligned}$$

где C_{XR} , C_{YR} — коэффициент продольной и поперечной сил руля соответственно; A_{RE} — приведённая (эффективная) площадь руля в плане; l_R — расстояние от центра тяжести судна до места установки руля.

Коэффициенты C_{XR} , C_{YR} зависят от угла атаки на руль α , который определяется с использованием следующей формулы [13]:

$$\alpha = \delta - \gamma_E \left(\beta + \frac{l_R}{\sqrt{V_x^2 + V_y^2}} \omega \right),$$

где γ_E — приведённый коэффициент влияния корпуса и винта на направление потока, набегающего на руль; β — угол дрейфа судна.

Коэффициент γ_E , в свою очередь, представляет собой произведение $\gamma_E = \gamma_1 \gamma_2$, где γ_1 — коэффициент влияния корпуса; γ_2 — коэффициент влияния винта, зависящий от частоты его вращения n .

Приведённая площадь $A_{RE} = A_{RO} + A_{RD}(1 + C_T)$, где A_{RO} — площадь руля, не попадающая в поток от винта; A_{RD} — площадь руля, расположенная в винтовой струе; C_T — коэффициент нагрузки винта по упору, зависящий от n при фиксированной скорости осевого натекания.

На основе приведённых выше рассуждений приходим к выводу, что

$$\begin{aligned} F_x^R &= F_x^R(V_x, V_y, \omega, \delta, n); \\ F_y^R &= F_y^R(V_x, V_y, \omega, \delta, n); \\ M_z^R &= M_z^R(V_x, V_y, \omega, \delta, n). \end{aligned}$$

Аэродинамические воздействия определяются следующими соотношениями [13]:

$$\begin{aligned} F_x^A &= C_{AX}(\rho/2)V_R^2 A_{VB}; \\ F_y^A &= C_{AY}(\rho/2)V_R^2 A_{VL}; \\ M_z^A &= C_{AM}(\rho/2)V_R^2 A_{VL}L, \end{aligned}$$

где C_{AX} , C_{AY} , C_{AM} — аэродинамические коэффициенты, зависящие от курсового угла относительного ветра α_R ; V_R — модуль вектора скорости относительного ветра; L — длина судна по ватерлинии; A_{VB} , A_{VL} — площади проекций надводной части корпуса на плоскость мидель-шпангоута и диаметральной плоскости соответственно.

Таким образом, аэродинамические силы и момент являются функциями элементов относительного ветра V_R , α_R .

Средние силы и момент, воздействующие на судно со стороны регулярного волнения, могут быть оценены с использованием следующих соотношений [14]:

$$F_x^W = C_{wx} \rho g L (0, 1 - \cos \gamma) (h/2)^2 \cdot \left(1, 0 + A_{2x} \frac{V_n \omega_w}{g} \right) \cdot \exp \left(-A_1 \frac{2\pi g}{\omega_w^2 L} \right);$$

$$F_y^W = C_{wy} \rho g L \sin \gamma (h/2)^2 \cdot \left(1, 0 + A_{2y} \frac{V_n \omega_w}{g} \right) \cdot \exp \left(-A_1 \frac{2\pi g}{\omega_w^2 L} \right);$$

$$M_z^W = C_{wm} \rho g L^2 \sin 2\gamma (h/2)^2 \cdot \left(1, 0 + A_{2m} \frac{V_n \omega_w}{g} \right) \cdot \exp \left(-A_1 \frac{2\pi g}{\omega_w^2 L} \right),$$

где $C_{wx}, C_{wy}, C_{wm}, A_{2x}, A_{2y}, A_{2m}$ — коэффициенты, зависящие от геометрических характеристик корпуса; $A_1 = \text{const}$; h, γ, ω_w — высота, курсовой угол, круговая частота волнения соответственно; g — ускорение свободного падения; V_n — проекция вектора относительной скорости на направление распространения волн. Круговая частота волнения, в свою очередь, выражается через его период τ известным соотношением $\omega_w = 2\pi / \tau$.

Таким образом, силы и момент волнового характера представляются как функции своих переменных в виде:

$$F_x^W = F_x^W(h, \gamma, \tau, V_x, V_y);$$

$$F_y^W = F_y^W(h, \gamma, \tau, V_x, V_y);$$

$$M_x^W = M_x^W(h, \gamma, \tau, V_x, V_y).$$

Проанализировав полученные выше зависимости для отдельных слагаемых правых частей уравнений (8), получим:

$$\begin{aligned} \dot{V}_x &= f_x(V_x, V_y, \omega, n, \delta, V_R, \alpha_R, h, \gamma, \tau); \\ \dot{V}_y &= f_y(V_x, V_y, \omega, n, \delta, V_R, \alpha_R, h, \gamma, \tau); \\ \dot{\omega} &= f_\omega(V_x, V_y, \omega, n, \delta, V_R, \alpha_R, h, \gamma, \tau), \end{aligned} \quad (10)$$

где f_x, f_y, f_ω — непрерывные функции.

Интегрируя соотношения (10) на промежутке времени $[t_{n-1}; t_n]$, получим:

$$\begin{aligned} V_x(t_n) &= V_x(t_{n-1}) + \int_{t_{n-1}}^{t_n} f_x(\cdot) dt; \\ V_y(t_n) &= V_y(t_{n-1}) + \int_{t_{n-1}}^{t_n} f_y(\cdot) dt; \\ \omega(t_n) &= \omega(t_{n-1}) + \int_{t_{n-1}}^{t_n} f_\omega(\cdot) dt. \end{aligned} \quad (11)$$

Значения интегралов, стоящих в правой части выражений (11), определяются видом функций f_x, f_y, f_ω на промежутке $[t_{n-1}; t_n]$. В рамках дискретной модели можно утверждать, что интегралы приближённо определяются значениями данных функций на концах временного отрезка, так как поведение их на внутренних точках неизвестно. Более того, интегралы определяются приближённо также ещё и потому, что величины V_x, V_y, ω на правой границе t_n неизвестны, так как они сами и являются искомыми параметрами. С учётом указанных ранее двух приближений будут справедливы следующие соотношения:

$$\begin{aligned} V_x(t_n) &= F_{VX}^1(X_{n-1}); \\ V_y(t_n) &= F_{VY}^1(X_{n-1}); \\ \omega(t_n) &= F_\omega^1(X_{n-1}), \end{aligned}$$

где входной вектор $X_{n-1} = \begin{pmatrix} V_x(t_{n-1}), V_y(t_{n-1}), \omega(t_{n-1}); \\ n(t_{n-1}), \delta(t_{n-1}), V_R(t_{n-1}), \alpha_R(t_{n-1}), h(t_{n-1}), \gamma(t_{n-1}), \tau(t_{n-1}); \\ n(t_n), \delta(t_n), V_R(t_n), \alpha_R(t_n), h(t_n), \gamma(t_n), \tau(t_n). \end{pmatrix}$

Аналогичные соотношения могут быть записаны и для момента времени t_{n+1} :

$$\begin{aligned} V_x(t_{n+1}) &= F_{VX}^2(X_n); \\ V_y(t_{n+1}) &= F_{VY}^2(X_n); \\ \omega(t_{n+1}) &= F_{\omega}^2(X_n), \end{aligned}$$

где входной вектор $X_n = \begin{pmatrix} V_x(t_n), V_y(t_n), \omega(t_n); \\ n(t_n), \delta(t_n), V_R(t_n), \alpha_R(t_n), h(t_n), \gamma(t_n), \tau(t_n); \\ n(t_{n+1}), \delta(t_{n+1}), V_R(t_{n+1}), \alpha_R(t_{n+1}), h(t_{n+1}), \gamma(t_{n+1}), \tau(t_{n+1}). \end{pmatrix}$

Перепишем последний вектор в виде $X_n = \begin{pmatrix} F_{VX}^1(X_{n-1}), F_{VY}^1(X_{n-1}), F_{\omega}^1(X_{n-1}); \\ n(t_n), \delta(t_n), V_R(t_n), \alpha_R(t_n), h(t_n), \gamma(t_n), \tau(t_n); \\ n(t_{n+1}), \delta(t_{n+1}), V_R(t_{n+1}), \alpha_R(t_{n+1}), h(t_{n+1}), \gamma(t_{n+1}), \tau(t_{n+1}). \end{pmatrix}$

Замечая, что вторая условная строка вектора X_n входит в состав вектора X_{n-1} , приходим к следующему выводу:

$$\begin{aligned} V_x(t_{n+1}) &= F_{VX}(X_{\text{din}}); \\ V_y(t_{n+1}) &= F_{VY}(X_{\text{din}}); \\ \omega(t_{n+1}) &= F_{\omega}(X_{\text{din}}), \end{aligned} \tag{12}$$

где вектор $X_{\text{din}} = \begin{pmatrix} V_x(t_{n-1}), V_y(t_{n-1}), \omega(t_{n-1}); \\ n(t_{n-1}), \delta(t_{n-1}), V_R(t_{n-1}), \alpha_R(t_{n-1}), h(t_{n-1}), \gamma(t_{n-1}), \tau(t_{n-1}); \\ n(t_n), \delta(t_n), V_R(t_n), \alpha_R(t_n), h(t_n), \gamma(t_n), \tau(t_n); \\ n(t_{n+1}), \delta(t_{n+1}), V_R(t_{n+1}), \alpha_R(t_{n+1}), h(t_{n+1}), \gamma(t_{n+1}), \tau(t_{n+1}). \end{pmatrix}$

Курс судна на момент времени t_{n+1} может быть получен с использованием формулы трапеций:

$$K(t_{n+1}) = K(t_n) + [\omega(t_n) + \omega(t_{n+1})](\Delta t / 2).$$

С учётом выражения (12) для $\omega(t_{n+1})$ и соответствующего соотношения для $\omega(t_n)$ получим

$$K(t_{n+1}) = K(t_n) + [F_{\omega}^1(X_{n-1}) + F_{\omega}(X_{\text{din}})](\Delta t / 2).$$

Так как все составляющие вектора X_{n-1} являются в то же время и составляющими вектора X_{din} , можно записать следующее: $K(t_{n+1}) = F_K(X_{\text{din}}, K(t_n))$.

Обозначив $Y_{\text{din}} = (V_x(t_{n+1}), V_y(t_{n+1}), K(t_{n+1}))^T$, получим отображение

$$Y_{\text{din}} = F_{\text{din}}(X_{\text{din}}, K(t_n)), \tag{13}$$

где F_{din} — отображение векторного пространства, которому принадлежит составной вектор $[X_{\text{din}}, K(t_n)]$, на векторное пространство, элементом которого является Y_{din} .

Отображение (13) может быть выполнено с любой наперед заданной точностью нейронной сетью, удовлетворяющей условиям теоремы универсальной аппроксимации, точнее, — связкой из трёх таких сетей. Будем называть такую сеть в дальнейшем *НС «Динамика»*. Её архитектура приведена на рис. 5. В связке сетей имеется нейронная сеть, прогнозирующая скорость дрейфа судна. Варианты реализации такой сети содержатся, например, в исследованиях [16] – [18].

На основе вышеизложенного может быть получена общая схема прогнозирующей модели, основанная на использовании нейронных сетей (рис. 6).

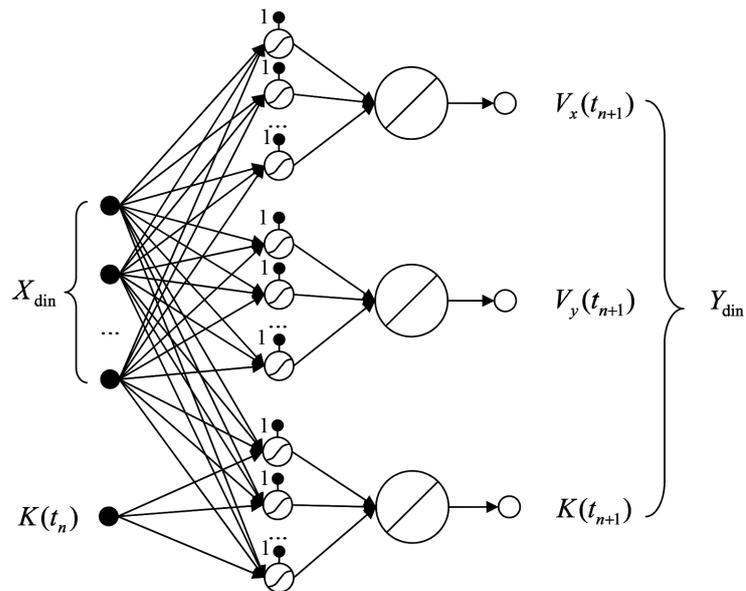


Рис. 5. Архитектура нейронной сети НС «Динамика»

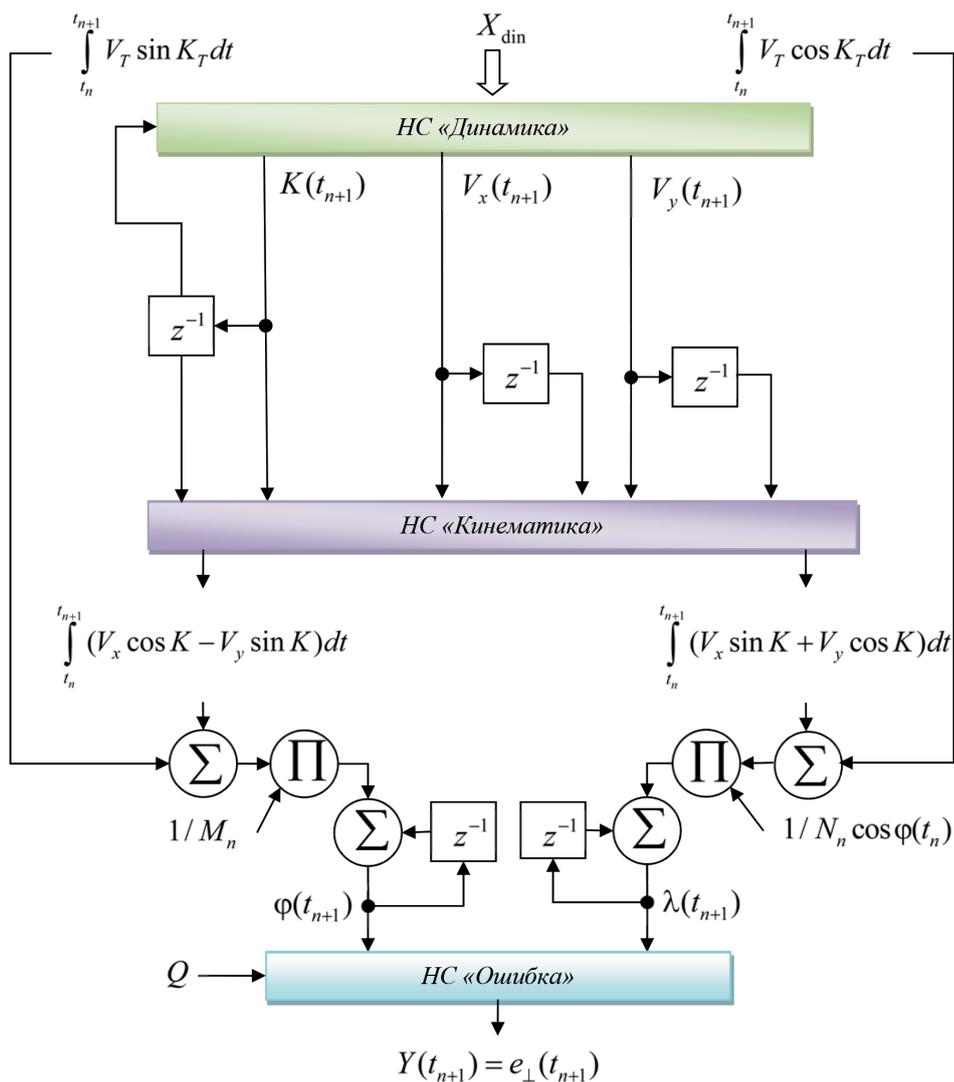


Рис. 6. Нейросетевая прогнозирующая модель ошибки стабилизации судна на траектории: общая схема

В состав прогнозирующей модели входят три нейронных сети: *НС «Динамика»*, *НС «Кинематика»*, *НС «Ошибка»*. Свободные параметры первой сети зависят от физических характеристик конкретного судна, а остальных сетей — нет. Поэтому последние две сети могут быть обучены заранее, в «лабораторных условиях», а *НС «Динамика»* должна обучаться на образцах, полученных в результате проведения натурных наблюдений. Здесь возможны три варианта. В первом варианте сеть обучается непосредственно по её входным образцам: $\{[X_{\text{din}}, K(t_n)], Y_{\text{din}}\}$. Во втором варианте используются образцы $\{[X_{\text{din}}, K(t_n)], Y_{\text{cin}}\}$. Наконец, в третьем случае для настройки сети используются пары $\{[X_{\text{din}}, K(t_n)], Y = e_{\perp}\}$. В последнем случае должны быть предприняты попытки для обеспечения того, чтобы в ходе эксперимента ошибка стабилизации e_{\perp} варьировалась в достаточно широких пределах. Для первых двух случаев натурные наблюдения могут проводиться специально или формирование образцов происходит в процессе текущей эксплуатации судна.

Предложенную архитектуру нейросетевой прогнозирующей модели удалось реализовать в пакете Neural Network Toolbox на основе MATLAB®R2018a (рис. 8). При этом все сумматоры и блоки умножения были представлены в виде нейронных сетей. В результате получилась единая нейронная сеть, состоящая из шестнадцати слоёв, шести входов (одного векторного X_{din} и пяти скалярных) и одного выхода $Y = e_{\perp}$. Скалярные входы составили величины $K(t_n)$, $\varphi(t_n)$, $\lambda(t_n)$, а также два интеграла от составляющих течения (вторые слагаемые правых частей соотношений (6)). Встроенными средствами MATLAB также было установлено, что данная нейронная сеть технически способна к обучению, т. е. процесс обучения такой сети может быть запущен в MATLAB.

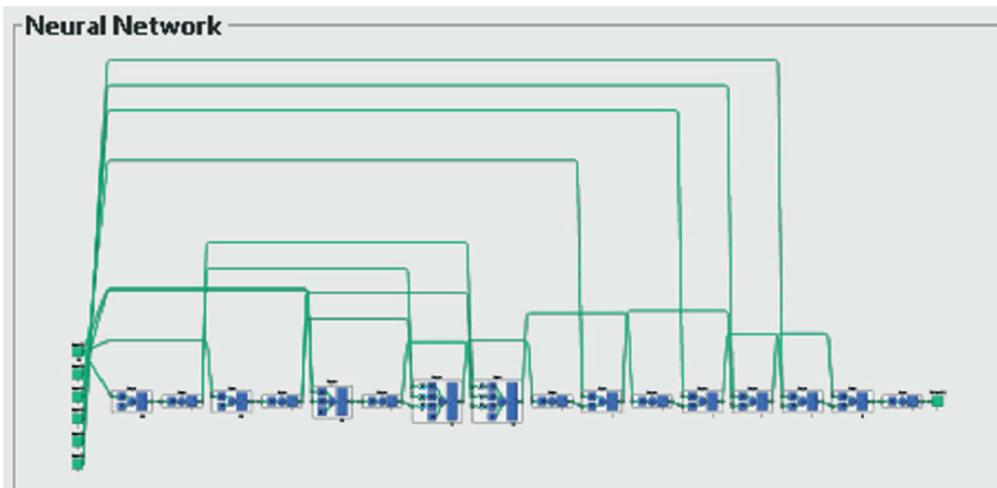


Рис. 8. Нейросетевая прогнозирующая модель ошибки стабилизации судна на траектории: реализация в MATLAB

Обсуждение результатов (Discussion of Results)

Предлагаемая архитектура (схема) прогнозирующей модели ошибки стабилизации судна на траектории состоит из трёх нейронных сетей, соединённых блоками суммирования, умножения, единичных задержек. Формально весь состав модели может быть представлен в виде единой нейронной сети, не относящейся к какому-либо стандартному типу. После определения общей схемы прогнозирующей модели возникает вопрос о том, как настроить нейросетевую прогнозирующую модель. Нейронные сети *НС «Ошибка»*, *НС «Кинематика»* могут быть обучены заранее, ведь их свободные параметры не зависят от физических характеристик конкретного судна. Сложнее обстоят дела с *НС «Динамика»*. Здесь можно выделить два подхода к её обучению. Первый подход заключается в том, что сеть обучается «раз и навсегда» для конкретного судна. Образцы для такого обучения могут быть получены в результате специально проведённых экспериментов или даже генерироваться на основе имитационной модели, в достоверности которой имеется боль-

шая степень уверенности. При таком подходе логично использовать преимущественно пакетный режим обучения. Второй подход состоит в том, что сеть «собирает» информацию о физических свойствах судна, последовательно обучаясь на образцах, поступающих по мере текущей его эксплуатации, т. е. в данном случае коэффициенты сети настраиваются всякий раз, когда поступает новый образец.

Преимуществом первого подхода по сравнению со вторым является то, что он обеспечивает, скорее всего, более быстрое обучение. Однако такой подход требует проведения специальных экспериментов, и в этом его недостаток. При последовательной настройке нейронной сети, по мере текущей эксплуатации судна, проведение специальных экспериментов не требуется, однако при таком подходе может потребоваться большее количество времени для достижения необходимой точности прогноза. Возможно также комбинирование двух подходов. Например, сеть предварительно обучается на основе накопленной выборки образцов (пакетный режим), а в процессе эксплуатации лишь несколько адаптируется к текущим условиям (последовательный режим).

Другим интересным выводом является тот факт, что для получения вектора $X_{\text{дин}}$ необходимо знать значения величин V_R, α_R, γ на шаг вперёд, которые, строго говоря, зависят от параметров движения судна, прогнозируемых НС «Динамика». В связи с этим использование данной сети может быть расширено с целью прогноза указанных параметров, если только они не могут считаться постоянными в данных условиях плавания судна.

Создание модели в среде MATLAB доказывает возможность построения прогнозирующей модели стабилизации судна на траектории в нейросетевом базисе, что имеет большое значение для быстрого поиска оптимального вектора углов перекадки руля на горизонте управления.

Конечно, предлагаемый вид нейросетевой прогнозирующей модели не является единственным возможным. В частности, НС «Кинематика» может принимать на вход также и элементы течения, что позволит не использовать блоки суммирования для учёта скорости постоянного течения.

Заключение (Conclusion)

Анализ уравнений движения судна в заданных условиях плавания показал, что в рамках весьма стандартных ограничений (упрощений) на их основе может быть построена прогнозирующая модель, которая предназначена для использования в алгоритме адаптивной стабилизации судна на заданной траектории (маршруте). Прогнозирующая модель состоит из трёх нейронных сетей, связанных блоками сложения, умножения и единичных задержек. Каждая нейронная сеть удовлетворяет условиям теоремы об универсальной аппроксимации и является двухслойной сетью прямого распространения, нейроны скрытого слоя которой имеют нелинейные функции активации, а нейроны выходного слоя — тождественные. Первая нейронная сеть отражает алгоритм получения ошибки отклонения от маршрута в перпендикулярном направлении и не имеет прямого отношения к движению вообще. Для определения отклонения необходимо знать лишь геодезические координаты объекта в данный момент и параметры, задающие маршрут на эллипсоиде. Вторая сеть преобразует кинематические параметры подвижного объекта, движущегося по поверхности эллипсоида. На вход поступают курс, продольная и поперечная относительная скорость. В итоге на её основе определяются приращения координат, пройденные относительно воды. Третья нейронная сеть отвечает за динамику судна.

На основе синтеза модели в MATLAB показано, что прогнозирующая модель может быть представлена в виде единой нейронной сети, имеющей фиксированную архитектуру. Предложенная нейросетевая модель имеет, скорее, концептуальный, теоретический характер, т. е. для её практического использования следует ещё решить ряд задач. Одной из таких задач является определение методов обучения всех трёх сетей, входящих в её состав. Метод обучения включает алгоритм формирования набора учебных данных и алгоритм настройки свободных параметров сети. Другой важной задачей является синтез алгоритмов тестирования сетей, содержащих, в частности, решение вопроса о разработке характеристик критериев, позволяющих судить о возможности

использования сетей в структуре прогнозирующей модели. После решения вопроса об адекватности прогнозирующей модели можно заняться вопросами её использования для решения задачи адаптивного удержания судна на траектории.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Вагущенко Л. Л. Системы автоматического управления движением судна / Л. Л. Вагущенко, Н. Н. Цымбал.— Одесса: Фенікс, 2007. — 328 с.
2. Дмитриев С. П. Задачи навигации и управления при стабилизации судна на траектории / С. П. Дмитриев, А. Е. Пелевин. — СПб.: ГНЦ РФ ЦНИИ «Электроприбор», 2002. — 160 с.
3. Довгобород Г. М. Синтез системы обработки информации и управления движением судна, использующей данные спутниковых навигационных систем: дис. ... канд. техн. наук: 05.13.14 / Георгий Моисеевич Довгобород. — М., 2000. — 208 с.
4. Fossen T. I. Handbook of Marine Craft Hydrodynamic and Motion Control / T.I. Fossen. — Chichester: John Wiley & Sons Ltd, 2011. — xviii. — 575 p.
5. Timchenko V. L. Optimization of nonlinear systems of variable structure for control of marine moving vehicles / V. L. Timchenko, O. A. Ukhin, D. O. Lebedev // Journal of Automation and Information Sciences. — 2017. — Vol.49.— Is.7. — Pp. 33–47. DOI: 10.1615/JAutomatInfScien.v49.i7.30.
6. Hui Z. Neural network robust control of ship trajectory tracking / Z. Hui, S. Ji-hong // Mechatronics and Automation (ICMA), 2014 IEEE International Conference on. — IEEE, 2014. — Pp. 1371–1375. DOI: 10.1109/ICMA.2014.6885899.
7. Liu C. Adaptive NN-DSC Control Design for Path Following of Underactuated Surface Vessels with Input Saturation / C. Liu, C.P. Chen, Z. Zou, T. Li // Neurocomputing. — 2017. — Vol. 267. — Pp. 466–474. DOI: 10.1016/j.neucom.2017.06.042.
8. Kula K. S. Model-based controller for ship track-keeping using neural network / K.S. Kula // Cybernetics (CYBCONF), 2015 IEEE 2nd International Conference on. — IEEE, 2015. — Pp. 178–183. DOI: 10.1109/CYB-Conf.2015.7175928.
9. Reese B. M. A graph search and neural network approach to adaptive nonlinear model predictive control / B.M. Reese, E.G. Collins Jr. // Engineering Applications of Artificial Intelligence. — 2016. — Vol.55. — Pp. 250–268. DOI: 10.1016/j.engappai.2016.07.001.
10. Soloway D. I. Neural generalized predictive control / D. Soloway, P.J. Haley // Proceedings of the 1996 IEEE International Symposium on Intelligent Control. — IEEE, 1996. — Pp. 277–282. DOI: 10.1109/ISIC.1996.556214.
11. Сотникова М. В. Многоцелевые законы цифрового управления подвижными объектами: дис. ... д.-ра физ.-мат. наук: 05.13.01 / М. В. Сотникова. — СПб., 2016. — 371 с.
12. Haykin S. Neural Networks and Learning Machines: Third Edition / S. Haykin. — New York: Prentice Hall, 2009. — xxx. — 906 p.
13. Справочник по теории корабля: в трех томах / под ред. Я. И. Войткунского. — Л.: Судостроение, 1985. — Т. 3. Управляемость водоизмещающих судов. Гидродинамика судов с динамическими принципами поддержания. — 539 с.
14. Средства активного управления судами / А. Ш. Афремов [и др.]. — Изд.2-е. — СПб.: Крыловский ГНЦ, 2016. — 182 с.
15. Гофман А. Д. Движительно-рулевой комплекс и маневрирование судна: справ. / А. Д. Гофман. — Л.: Судостроение, 1988. — 360 с.
16. Дерябин В. В. Нейронная сеть как алгоритм прогноза скорости дрейфа судна // Вестник компьютерных и информационных технологий / В. В. Дерябин. — 2015. — № 6 (132). — С. 11–17. DOI: 10.14489/vkit.2015.06.pp.011-017.
17. Дерябин В. В. Нейросетевые системы прогноза скорости дрейфа судна / В. В. Дерябин // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С.О. Макарова. — 2015. — № 5 (33).— С. 7–14. DOI: 10.21821/2309-5180-2015-7-5-1-14.
18. Дерябин В. В. Нейро-нечёткая модель счисления пути судна / В. В. Дерябин, А. Е. Сазонов // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С.О. Макарова. — 2015. — № 4 (32). — С. 7–16.

REFERENCES

1. Vagushchenko, L. L., and N. N. Tsymbal. *Sistemy avtomaticheskogo upravleniya dvizheniem sudna*. Odessa: Feniks, 2007.
2. Dmitriev, S. P., and A. E. Pelevin. *Zadachi navigatsii i upravleniya pri stabilizatsii sudna na traektorii*. SPb.: GNTs RF TsNII «Elektropribor», 2002.
3. Dovgoborod, G. M. Sintez sistemy obrabotki informatsii i upravleniya dvizheniem sudna, ispol'zuyushchei dannye sputnikovykh navigatsionnykh system. PhD diss. M., 2000.
4. Fossen, Thor. I. *Handbook of Marine Craft Hydrodynamics and Motion Control*. Chichester: John Wiley & Sons Ltd, 2011.
5. Timchenko, Victor L., Oleg A. Ukhin, and Denis O. Lebedev. "Optimization of Nonlinear Systems of Variable Structure for Control of Marine Moving Vehicles." *Journal of Automation and Information Sciences* 49.7 (2017): 33–47. DOI: 10.1615/JAutomatInfScien.v49.i7.30.
6. Hui, Zhao, and Shen Ji-hong. "Neural network robust control of ship trajectory tracking." *Mechatronics and Automation (ICMA), 2014 IEEE International Conference on*. IEEE, 2014: 1371–1375. DOI: 10.1109/ICMA.2014.6885899.
7. Liu, Cheng, C. Philip Chen, Zaojian Zou, and Tieshan Li. "Adaptive NN-DSC control design for path following of underactuated surface vessels with input saturation." *Neurocomputing* 267 (2017): 466–474. DOI: 10.1016/j.neucom.2017.06.042.
8. Kula, Krzysztof S. "Model-based controller for ship track-keeping using Neural Network." *Cybernetics (CYBCONF), 2015 IEEE 2nd International Conference on*. IEEE, 2015: 178–183. DOI: 10.1109/CYBCONF.2015.7175928.
9. Reese, Brandon M., and Emmanuel G. Collins Jr. "A graph search and neural network approach to adaptive nonlinear model predictive control." *Engineering Applications of Artificial Intelligence*. 55 (2016): 250–268. DOI: 10.1016/j.engappai.2016.07.001.
10. Soloway, Donald, and Pamela J. Haley. "Neural generalized predictive control. A Newton-Raphson Implementation" *Proceedings of the 1996 IEEE International Symposium on Intelligent Control*. IEEE, 1996. 277–282. DOI: 10.1109/ISIC.1996.556214.
11. Sotnikova, M. V. *Mnogotsel'evyeyzakonytsifrovogoupravleniyapodvizhnyimiob"ektami*. Dr. diss. SPb., 2016.
12. Haykin, Simon. *Neural Networks and Learning Machines: Third Edition*. New York: Prentice Hall, 2009.
13. Voitkunsky, Ya. I. "Manoeuvrability of conventional ships. Hydrodynamics of gliders hydrofoils and hovercrafts." *Ship Theory Handbook*. L.: Sudostroenie, 1985.
14. Afremov, A. Sh., et al. *Sredstva aktivnogo upravleniya sudami*. 2nd ed. SPb.: Krylovskii GNTs, 2016.
15. Gofman, A. D. *Dvizhitel'no-rulevoi kompleks i manevrirovaniye sudna: spravochnik*. L.: Sudostroenie, 1988.
16. Deryabin, V. V. "Neural Network Algorithm of Vessel's Drift Speed Prediction." *Vestnik komp'yuternykh i informatsionnykh tekhnologii* 6(132) (2015): 11–17. DOI: 10.14489/vkit.2015.06.pp.011-017.
17. Deryabin, Victor Vladimirovich. "Neural network based vessel's speed of drift prediction systems." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova* 5(33) (2015): 7–14. DOI: 10.21821/2309-5180-2015-7-5-1-14.
18. Deryabin, V. V., and A. E. Sazonov. "Neuro-fuzzy vessel's dead reckoning model." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova* 4(32) (2015): 7–16.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

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

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

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

Статья поступила в редакцию 27 июня 2018 г.

Received: June 27, 2018.

DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-4-679-686

DETERMINATION OF THE REQUIRED QUANTITY OF TECHNOLOGICAL RESOURCES OF PORTS AND CARGO TERMINALS BY THE METHOD OF IMITATION MODELING

O. A. Izotov, A. V. Gulyaev

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

The article: In the article was considered the key differences between the approach based on simulation and the approaches using computationally-analytical and statistical methods. Demonstrated simulation modeling which in this study examines the option of discrete-event simulation. A mathematical description of the canonical abstract automaton as a discrete device is presented, which transforms information which consists of a set of six elements. The using of the Mile and Moore models to show the functioning of the automaton in question revealed differences in the chosen approaches. The stated task is solved - the general parameters of the Moore automaton description are revealed through specific parameters of the modeled object using the method of verbal interpretation and logical operators. The ability (not ability) of the simulated system to cope (not cope) with the current task of the production line, which is the sum of the volume of orders received at that moment and the amount of outstanding operations that have been left to this moment, is revealed at a particular moment in time. Logically summed-if this volume does not exceed the available capacity of the system, all operations are performed and the queue disappears. If the available ability is not enough, the queue increases. Thus, the corresponding models are easily implemented by any software: from algorithmic languages to MS Office Excel, do not represent any independent value, and we decided to do it in detail here. As a visualization, a typical frequency spectrum is shown in the histogram of the queue length, which occurs in the most interesting case for practice, with four and five production lines.

Keywords: ports and cargo terminals, simulation, discrete event simulation, the performance of the production line, Moore automaton, model Mealy, automata theory, Boolean operators, verbal interpretation of the machine.

For citation:

Izotov, Oleg A., and Alexander V. Gulyaev. "Determination of the required quantity of technological resources of ports and cargo terminals by the method of imitation modeling." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 10.4 (2018): 679–686. DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-4-679-686.

УДК 656.076

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТРЕБУЕМОГО КОЛИЧЕСТВА ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ РЕСУРСОВ ПОРТОВ И ГРУЗОВЫХ ТЕРМИНАЛОВ МЕТОДОМ ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

О. А. Изотов, А. В. Гультяев

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

В статье рассмотрены ключевые отличия подхода к расчету основных технологических параметров строящегося или реконструируемого порта (грузового терминала), опирающегося на имитационное моделирование, от подходов, использующих расчетно-аналитические и статистические методы. Продемонстрировано имитационное моделирование, в качестве которого в данном исследовании рассматривается вариант дискретно-событийного имитационного моделирования. Представлено математическое описание канонического абстрактного автомата как дискретного устройства, преобразующее информацию, которое состоит из множества элементов. Использование моделей Мили и Мура для отображения функционирования рассматриваемого автомата позволило выявить отличия в выбранных подходах. Решена поставленная задача — раскрыты общие параметры описания автомата Мура через конкретные параметры моделируемого объекта с использованием метода вербальной ин-

терпретации и логических операторов. Выявлена способность / неспособность моделируемой системы в конкретный момент времени справиться / не справиться с текущим заданием технологической линии, которое представляет собой сумму поступившего в этот момент объема заявок на операции и оставшегося к этому моменту объема невыполненных операций. Логически подытожено следующее: если этот объем не превышает имеющуюся способность системы, то все операции выполняются, и очередь исчезает. Если имеющейся способности недостаточно, очередь увеличивается. Таким образом, соответствующие модели легко реализуются любыми программными средствами: от алгоритмических языков до MS Office Excel, и не представляют собой никакой самостоятельной ценности, поэтому было принято решение подробно в статье их не описывать. В качестве визуализации приведен типичный спектр частот в гистограмме длины очереди, возникающей в наиболее интересном для практики случае — при четырех и пяти технологических линиях.

Ключевые слова: порты и грузовые терминалы, имитационное моделирование, дискретно-событийное имитационное моделирование, производительность технологической линии, автомат Мура, модель Мили, теория автоматов, логические операторы, вербальная интерпретация автомата.

Для цитирования:

Изотов О. А. Определение требуемого количества технологических ресурсов портов и грузовых терминалов методом имитационного моделирования / О. А. Изотов, А. В. Гультяев // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2018. — Т. 10. — № 4. — С. 679–686. DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-4-679-686.

Введение (Introduction)

Современные тенденции развития портов и грузовых терминалов показывают актуальность не только начального технологического проектирования вновь возводимых объектов инфраструктуры, но и последующего («вторичного») технологического проектирования возможного переоборудования терминалов в целях их модернизации либо перепрофилирования (смены специализации, универсализации, внедрения специализации). Это требует проведения достаточно оперативных расчетов необходимых технологических ресурсов в условиях высокой неопределенности [1] – [3]. В настоящее время сосуществуют два основных подхода к решению указанных вопросов. Основным отличием подхода, основанного на имитационном моделировании, от подходов, использующих расчетно-аналитические и статистические методы, является наличие некоторого внутреннего параметра (группы параметров), которые характеризуют внутреннее состояние моделируемого объекта [4] – [6]. В расчетно-аналитических и статистических подходах выходные параметры модели, изменение которых во времени характеризует поведение системы, в каждый момент времени полностью определяются входными параметрами [7].

В случае имитационного моделирования, в качестве которого здесь рассматривается вариант дискретно-событийного имитационного моделирования, реакция системы на входные сигналы зависит не только от входных сигналов, но и от состояния, в котором находится система в конкретный момент времени. Одновременно входные сигналы и текущее состояние системы определяют состояние системы в следующий момент времени. Таким образом, на одни и те же сигналы система может реагировать по-разному, т. е. демонстрировать разное поведение и разную последовательность смены состояния [8], [9]. Задачей настоящего исследования является обоснование метода достоверного определения перечня и количества технологических ресурсов преобразуемого порта (терминала), основанного на современных подходах к имитационному моделированию.

Методы и материалы (Methods and Materials)

Используя терминологию теории автоматов, следует расчетно-аналитические и статистические модели отнести к комбинационным схемам, в то время как имитационные дискретно-событийные модели относятся к классу автоматов с памятью. Все они относятся к абстрактным автоматам [10] – [12].

Канонический абстрактный автомат представляет собой дискретное устройство, преобразующее информацию. Математическое описание такого устройства представляет собой множество, состоящее из шести элементов:

$$S = \{X, Q, Y, \delta, \lambda, q_0\},$$

где S — абстрактный автомат;

X — множество входных символов (входной алфавит): $S = \{X_1, \dots, X_m\}$;

Q — множество состояний автомата: $Q = \{q_1, \dots, q_n\}$;

Y — множество выходных символов (выходной алфавит): $Y = \{y_1, \dots, y_p\}$;

δ — функция переходов автомата из одного состояния в другое: $q_j = \delta\{q_i, x_k\}$;

λ — функция выходов: $y_l = \lambda\{q_i, x_k\}$;

q_0 — начальное состояние автомата;

q_j — следующее (новое) состояние автомата;

q_i — текущее состояние автомата;

x_k — текущий входной символ;

y_l — текущий выходной символ.

Дадим следующее определение: *автомат называется конечным, если множества X, Q, Y конечны, и бесконечным в противном случае.*

В теории автоматов используемое время t считается дискретной величиной, т. е. $t = nT$, где T представляет собой целочисленный интервал (такт), разделяющий дискретные моменты времени. Обычно для простоты и наглядности полагают $T = 1$, поскольку тогда $t = n$, т. е. дискретное время представляет собой упорядоченный ряд натуральных чисел. Представление абстрактного автомата приведено на рис. 1.

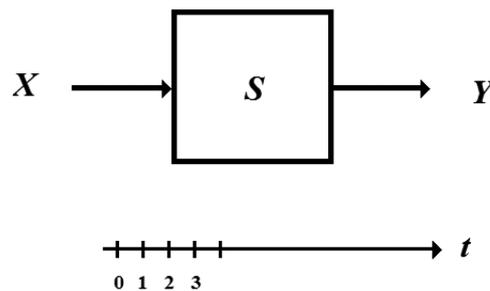


Рис. 1. Представление абстрактного автомата

Согласно приведенному определению, выходной символ абстрактного автомата $y_l \in Y$ зависит не только от входного символа $x_k \in X$, но и от того, в каком состоянии $q_i \in Q$ находится автомат. Автомат функционирует в дискретном времени (это означает, что элементы описания автомата заданы только в указанные ранее дискретные моменты).

Представим, что с некоторого момента времени на вход автомата подаются входные символы, образующие входное слово некоторой длины L (длина понимается как число символов в слове). Пусть это i -е слово состоит из символов $x_1^i, x_2^i, \dots, x_L^i$. Очевидно, что в соответствии с данным ранее определением, на выходе будет получено выходное слово той же длины $y_1^i, y_2^i, \dots, y_L^i$. Таким образом, абстрактный автомат может рассматриваться как устройство преобразования входных слов в выходные с сохранением длины передаваемого слова (рис. 2).

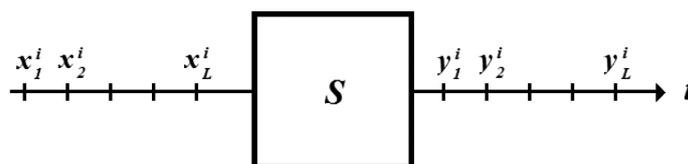


Рис. 2. Преобразование входной последовательности символов в выходную

Символы алфавитов, присутствующие на входе и выходе автомата, называют *входными и выходными сигналами*. Конкретные функции переходов и выходов полностью определяют

преобразование входных сигналов в выходные, или функционирование абстрактного автомата [7], [8].

На практике широкое распространение получили две основные модели, описывающие это функционирование, а именно: модель автомата Мили и модель автомата Мура [9], [10].

В модели Мили законы функционирования автомата представлены следующим образом:

$$\begin{aligned} q[t+1] &= \delta(q[t], x[t]); \\ y[t] &= \lambda(q[t], x[t]), \end{aligned}$$

где t — текущий момент времени;

$t+1$ — следующий момент времени;

$q[t+1]$ — состояние автомата в следующий момент времени;

$q[t]$ — состояние автомата в текущий момент времени;

$x[t]$ — входной сигнал автомата в текущий момент времени;

$y[t]$ — выходной сигнал автомата в текущий момент времени.

В модели Мура законы функционирования автомата представлены несколько по-другому:

$$\begin{aligned} q[t+1] &= \delta(q[t], x[t]); \\ y[t] &= \lambda(q[t]). \end{aligned}$$

Разница состоит в том, что в модели Мура выходной сигнал явно зависит только от состояния, а косвенно — и от входного сигнала.

В теории автоматов доказано, что любой автомат можно представить той или иной моделью. В данном исследовании соображения удобства продиктовано представление модели в виде автомата Мура. Будем представлять модель выполнения операций в условиях имеющихся технологических ресурсов в виде конечного абстрактного автомата, функционирование которого описывает его как автомат Мура. В рассматриваемом случае входным сигналом $x[t]$ будет являться средняя потребность в выполнении операций за интервал T на протяжении периода $T_{\text{зад}}$, выходным сигналом $y[t]$ — количество выполненных операций за этот интервал. Наконец, состояние автомата $q[t]$ будет характеризовать количество невыполненных к этому моменту времени заявок вследствие дефицита имеющегося оборудования.

Задачей настоящего исследования является раскрытие общих параметров описания автомата Мура через конкретные параметры моделируемого объекта.

Результаты (Result)

Пусть в некоторый момент времени t число имеющихся технологических линий составляет $N[t]$. Производительность каждой из этих линий в каждый момент времени характеризуется случайной величиной $P_n[t]$, а производительность всей системы составляет величину $P_n[t] = \sum_{n=1}^{N[t]} P_n$.

При этом $P_n[t] = \sum_{n=1}^{N[t]} P_n \neq N[t] \cdot P_n$, поскольку представляет собой сумму значений $N[t]$ случайных величин, а не увеличенное в $N[t]$ раз значение одной случайной величины P_n .

Полученное значение характеризует способность моделируемой системы в конкретный момент времени справиться с текущим заданием, которое представляет собой сумму поступившего в этот момент объема заявок на операции и оставшегося к этому моменту объема невыполненных операций. Если этот объем не превышает имеющуюся способность системы, то все операции выполняются, и очередь исчезает. Если имеющейся способности недостаточно, то очередь увеличивается [11].

Во введенных ранее обозначениях функционирование соответствующего автомата будет характеризоваться следующими законами:

$$\text{Оч.}[t + 1] = \text{Если} \{ \text{Вх.}[t] + \text{Оч.}[t] > P[t] \}, \text{то} \{ \text{Вх.}[t] + \text{Оч.}[t] - P[t] \}, \text{иначе} \{ 0 \}.$$

$$\text{Вых.}[t] = \text{Если} \{ \text{Вх.}[t] + \text{Оч.}[t] > P[t] \}, \text{то} \{ P[t] \}, \text{иначе} \{ \text{Вх.}[t] + \text{Оч.}[t] \}.$$

Вербальная интерпретация указанных операторов такова:

– если задание на выполнение операций, которое равно сумме входной и стоящей в очереди заявок $\text{Вх.}[t] + \text{Оч.}[t]$, превышает текущую пропускную способность системы $P[t]$, то это превышение задания над возможностями образует очередь $\text{Вх.}[t] + \text{Оч.}[t] - P[t]$, в противном случае очередь не образуется;

– если задание на выполнение операций $\text{Вх.}[t] + \text{Оч.}[t]$ превышает текущую пропускную способность системы $P[t]$, то выполняется максимально возможное число операций $P[t]$, в противном случае выполняется все задание.

Обсуждение (Discussion)

Очевидно, что приведенные выше логические операторы определяют конечный абстрактный автомат Мура. Соответствующая модель легко реализуется любыми программными средствами: от алгоритмических языков до *MS Office Excel*, не представляет собой никакой самостоятельной ценности и потому специально здесь не описывается.

Рис. 3, а показывает пример имитационного моделирования обработки заявок. Из этого рисунка видно, что три технологических линии не справляются с объемом заявок, поскольку их очередь монотонно возрастает за время моделирования. Действительно, расчетно-аналитический метод для данного примера требует наличия 3,8 технологических линий [12].

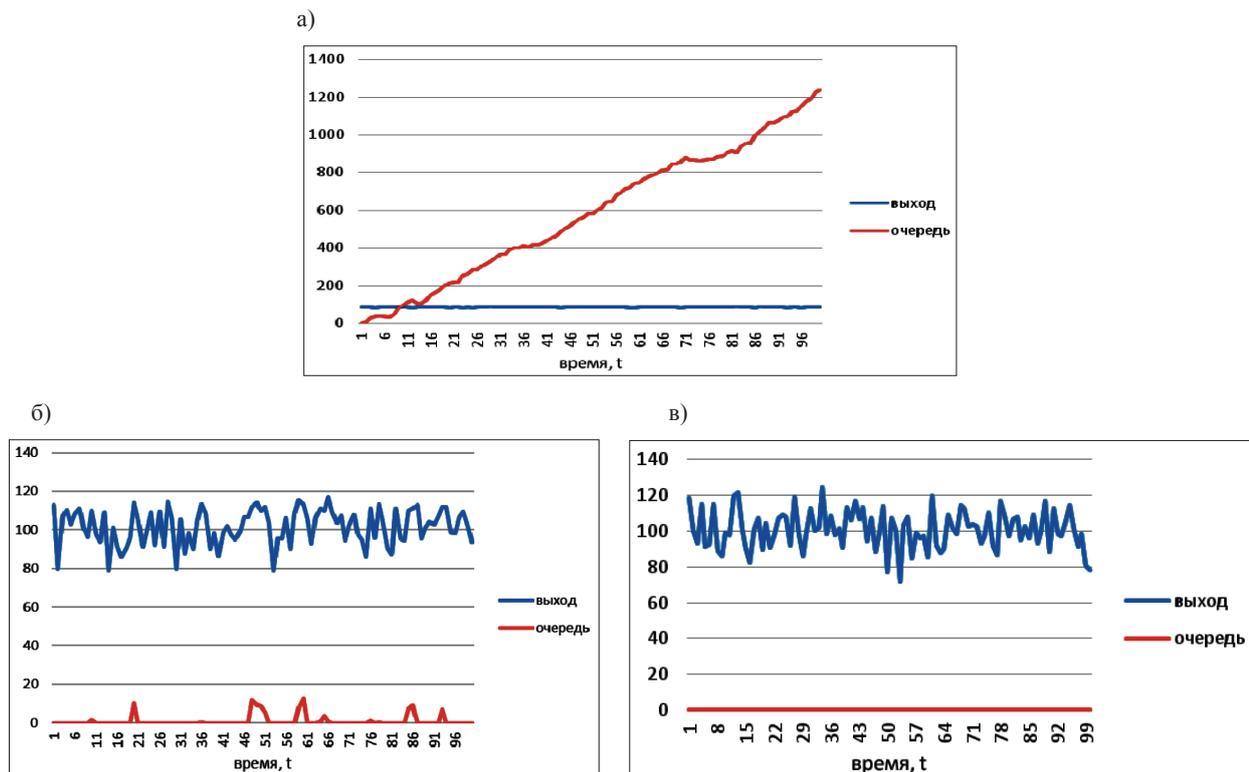


Рис. 3. Результаты моделирования:

а — при трех линиях; б — при четырех линиях; в — при пяти линиях

На рис. 3, б приведены результаты моделирования для случая четырех технологических линий. Из этого рисунка видно, что периодически возникающие всплески поступления заявок приводят к временному образованию очереди, которая достаточно быстро исчезает. На рис. 3, в приведены результаты моделирования для пяти технологических линий. Как видно из этого рисунка, в моделируемом случае очередей не образуется вовсе.

На рис. 4 приведен типичный спектр частот в гистограмме длины очереди, возникающей в наиболее интересном для практики случае — при четырех технологических линиях.

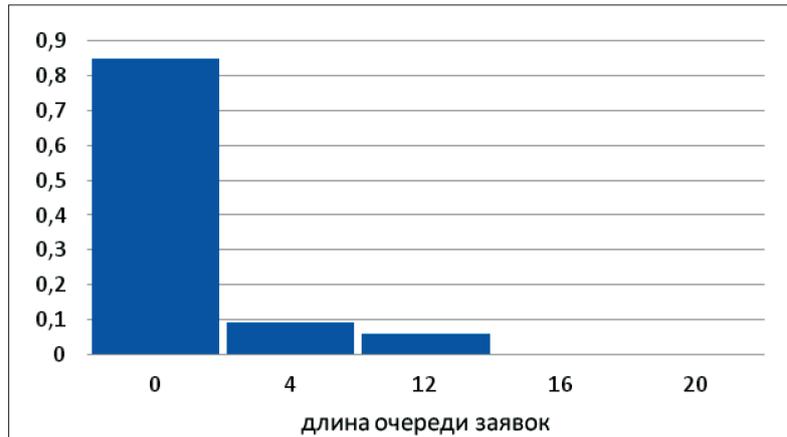


Рис. 4. Спектр частот длины очереди для четырех линий

Как видно из этого рисунка, в 91 % случаев очереди не возникает вообще, длина очереди в 4 – 11 заявок составляет 5 %, длина 12 – 15 заявок наблюдается в 3 % случаев, большая длина составляет 1 %.

Выводы (Summary)

1. В рассмотренном случае дискретно-событийного имитационного моделирования, было выявлено, что реакция системы на входные сигналы зависит не только от самих входных сигналов, но и от состояния, в котором находится система в конкретный момент времени. Одновременно, входные сигналы и текущее состояние системы определяют состояние системы в следующий момент времени. Таким образом, на одни и те же сигналы система может реагировать по-разному, т. е. демонстрировать разное поведение и разную последовательность смены состояния.

2. Предложенный учет такой разницы, положенный в основу метода определения требуемого количества технологических ресурсов портов и грузовых терминалов, позволяет с высокой степенью достоверности предвидеть пиковые состояния системы по частоте и величине и делать экономически эффективные планы оснащения конструируемых и реконструированных объектов технологическим оборудованием, рациональным по составу и количеству.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Тарасов В. С. Моделирование технологических процессов с распределенными параметрами / В. С. Тарасов, И. А. Веренинов, В. Я. Ерунов. — Л.: Изд-во ЛПИ, 1982. — 288 с.
2. Глейм В. В. Имитационное моделирование морских грузовых терминалов на примере Новороссийского контейнерного терминала / В. В. Глейм // Материалы междунар. науч.-практ. конф. «Имитационное и комплексное моделирование морской техники и морских транспортных систем 2011». — СПб., 2011. — С. 55–58.
3. Панова Ю. Н. Способы повышения пропускной способности морских контейнерных портов / Ю. Н. Панова, Е. К. Коровяковский // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. — 2012. — № 2 (46). — С. 139–144.
4. Yip T. L. Modeling the effects of competition on seaport terminal awarding/ T. L. Yip, J. J. Liu, X. Fu, J. Feng // Transport Policy. — 2014. — Vol. 35. — Pp. 341–349. DOI: 10.1016/j.tranpol.2014.04.007.
5. Taner M. E. Layout analysis affecting strategic decisions in artificial container terminals / M. E. Taner, O. Kulak, M. U. Koyuncuoğlu // Computers & Industrial Engineering. — 2014. — Vol. 75. — Pp. 1–12. DOI: 10.1016/j.cie.2014.05.025.

6. Coronado Mondragon A. E. ICT adoption in multimodal transport sites: Investigating institutional-related influences in international seaports terminals / A. E. Coronado Mondragon, C. E. Coronado Mondragon, Etienne S. Coronado // Elsevier Transportation Research Part A: Policy and Practice. — 2017. — Vol. 97. — Pp. 69–88. DOI: 10.1016/j.tra.2017.01.014.

7. Беленький А. С. Исследование операций в транспортных системах: идеи и схемы методов оптимизации планирования / А. С. Беленький. — М.: Мир, 1992. — 582 с.

8. Пьяных С. М. Экономико-математические методы оптимального планирования работы речного транспорта: учебник для институтов водного транспорта / С. М. Пьяных. — М.: Транспорт, 1988. — 253 с.

9. Кузнецов А. Л. Морская контейнерная транспортно-технологическая система: монография / А. Л. Кузнецов, А. В. Кириченко, А. А. Давыденко. — СПб.: Изд-во МАНЭБ, 2017. — 320 с.

10. Мицель А. А. Исследование операций и методы оптимизации: в 2 ч. / А. А. Мицель. — Томск: Изд-во ТУСУР, 2016. — Ч. 1. — 167 с.

11. Кузнецов А. Л. Транспортный узел: к вопросу об организации деятельности / А. Л. Кузнецов, Я. Я. Эглит, А. В. Кириченко // Транспорт Российской Федерации. — 2013. — № 1 (44). — С. 30–33.

12. Изотов О. А. Оценка требуемых технологических ресурсов путем статистического моделирования / О. А. Изотов, А. В. Гульгяев // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2018. — Т. 10. — № 3. — С. 497–506. DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-3-497-50.

REFERENCES

1. Tarasov, V.S., I.A. Vereninov, and V.Ya. Erunov. *Modelirovanie tekhnologicheskikh protsessov s raspredelennymi parametrami*. L.: Izd-vo LPI, 1982.

2. Gleim, V.V. “Imitatsionnoe modelirovanie morskikh gruzovykh terminalov na primere Novorossiiskogo konteinerного terminala.” *Materialy mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii «Imitatsionnoe i kompleksnoe modelirovanie morskoi tekhniki i morskikh transportnykh sistem 2011»*. SPb., 2011. 55–58.

3. Panova, Yulia Nikolaevna, and Eugene Konstantinovich Korovyakovsky. “Ways for increasing the capacity of container seaports.” *Vestnik Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putey Soobshcheniya* 2 (46) (2012): 139–144.

4. Yip, Tsz Leung, John Jianhua Liu, Xiaowen Fu, and Jiejian Feng. “Modeling the effects of competition on seaport terminal awarding.” *Transport Policy* 35 (2014): 341–349. DOI: 10.1016/j.tranpol.2014.04.007.

5. Taner, M.E., O. Kulak, and M. U. Koyuncuoğlu. “Layout analysis affecting strategic decisions in artificial container terminals.” *Computers & Industrial Engineering* 75 (2014): 1–12. DOI: 10.1016/j.cie.2014.05.025.

6. Coronado Mondragon, Adrian E., Christian E. Coronado Mondragon, and Etienne S. Coronado. “ICT adoption in multimodal transport sites: Investigating institutional-related influences in international seaports terminals.” *Elsevier Transportation Research Part A: Policy and Practice* 97 (2017): 69–88. DOI: 10.1016/j.tra.2017.01.014.

7. Belen’kii, A.S. *Issledovanie operatsii v transportnykh sistemakh: idei i skhemy metodov optimizatsii planirovaniya*. M.: Mir, 1992.

8. P’yanykh, S.M. *Ekonomiko-matematicheskie metody optimal’nogo planirovaniya raboty rechnogo transporta: Uchebnik dlya institutov vodnogo transporta*. M.: Transport, 1988.

9. Kuznetsov, A.L., A.V. Kirichenko, and A.A. Davydenko. *Morskaya konteinerная transportno-tekhnologicheskaya sistema: monografiya*. SPb.: Izd-vo MANEB, 2017.

10. Mitsel’, A.A. *Issledovanie operatsii i metody optimizatsii. Chast’ I*. Tomsk: Izd. TUSUR, 2016.

11. Kuznetsov, A.L., Ya.Ya. Eglit, and A.V. Kirichenko. “On the issue of organising the operation of a transport hub.” *Transport of Russian Federation* 1(44) (2013): 30–33.

12. Izotov, Oleg A., and Alexander V. Gulyaev. “Assessment of required technological resources by statistical simulation.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 10.3 (2018): 497–506. DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-3-497-506.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Изотов Олег Альбертович —

кандидат технических наук, доцент
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени
адмирала С.О. Макарова»
198035, Российская Федерация,
Санкт-Петербург, ул. Двинская, 5/7
e-mail: izotovoa@gumrf.ru, iztv65@rambler.ru

Гультяев Александр Вадимович — аспирант

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

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Izotov, Oleg A. —

PhD, associate professor
Admiral Makarov State University
of Maritime and Inland Shipping
5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg,
198035, Russian Federation
e-mail: izotovoa@gumrf.ru, iztv65@rambler.ru

Gulyaev, Alexander V. — Postgraduate

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

Статья поступила в редакцию 10 июля 2018 г.

Received: July 10, 2018.

DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-4-687-695

COOPERATIVE MANEUVERING OF UNMANNED SHIPS FOR COLLISION AVOIDANCE AT SEA

S. V. Smolentsev¹, A. E. Sazonov¹, Yu. M. Iskanderov²

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

2 — St. Petersburg Institute for Informatics and Automation of the Russian
Academy of Sciences, St. Petersburg, Russian Federation

The article investigates the problem of collision avoidance of a group of ships offshore. To solve this problem it is necessary to ensure the cooperative maneuvering of several vessels from the group. The article looks into the case of unmanned ships, when each vessel is operated automatically. The use of unmanned technologies can eliminate the human factor on the safety of navigation. For this, it is necessary to develop reliable ship control algorithms in automatic mode.

The publication proposes an algorithm for solving this problem. To this end, from the total amount of vessels in a given area we distinguish between the subsets of dangerous ships, privileged vessels, vessels obliged to maneuver, and ships that restrict the scope of solution. A method for constructing these subsets is described. A subset of dangerous ships is constructed by pair wise assessing the danger of rapprochement of each vessel with the rest of the vessels from the group. For this, it is necessary to synthesize forecasts of the trajectories of all vessels in the water area. A risk scale and an algorithm for estimate the collision of ships are proposed. A number of dangerously moving ships are divided into two subsets: privileged vessels and vessels obliged to maneuver. A safe divergence must be ensured by maneuvering these vessels. The remaining vessels in the water area are restrictions when seeking a solution. In the case where no solution can be found, a procedure to reduce the restrictions by moving ships from one set to another and re-searching for solutions is proposed. The final answer can be a set of changed routes for vessels obliged to maneuver.

To carry out cooperative action is necessary to ensure the exchange of information between the automatic agents. This topic is also touched upon in the article.

Keywords: unmanned ship, cooperative maneuvering, collision avoidance, COLREG-72.

For citation:

Smolentsev, Sergey V., Anatolii E. Sazonov, and Yurii M. Iskanderov. "Cooperative maneuvering of unmanned ships for collision avoidance at sea." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 10.4 (2018): 687–695. DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-4-687-695.

УДК 656.61.052

КООПЕРАТИВНОЕ МАНЕВРИРОВАНИЕ БЕЗЭКИПАЖНЫХ СУДОВ ДЛЯ БЕЗОПАСНОГО РАСХОЖДЕНИЯ В МОРЕ

С. В. Смоленцев¹, А. Е. Сазонов¹, Ю.М. Искандеров²

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

² — Санкт-Петербургский институт информатики и автоматизации
Российской академии наук, Санкт-Петербург, Российская Федерация

В статье рассматривается проблема безопасного расхождения группы судов в море. Для ее решения необходимо обеспечить кооперативное маневрирование нескольких судов из этой группы. Рассматривается ситуация безэкипажных судов, когда каждым судном управляет автоматический агент. Использование безэкипажных технологий позволяет исключить влияние человеческого фактора на безопасность мореплавания. Для этого необходимо разработать надежные алгоритмы управления судами в автоматическом режиме. Предложен алгоритм решения данной задачи. Для этого во множестве судов в заданной акватории выделяются подмножества опасно идущих судов, привилегированных судов, судов, обязанных маневрировать, судов, представляющих ограничения для решения. Описан метод построения указанных

подмножеств. Подмножество опасно идущих судов строится путем попарной оценки опасности сближения каждого судна с остальными судами из группы. Для этого необходимо синтезировать прогнозы траекторий движения всех судов в акватории. Предложена шкала риска и алгоритм оценки опасности сближения судов. Множество опасно идущих судов делится на два подмножества: привилегированные суда и суда, обязанные маневрировать. Безопасное расхождение необходимо обеспечить маневрированием этих судов. Остальные суда в акватории являются ограничениями при поиске решения. В случае отсутствия решения предлагается процедура смягчения ограничений за счет перемещения судов из одного множества в другое и повторного поиска решений. Полученное решение является набором измененных маршрутов для судов, обязанных маневрировать. Для проведения кооперативных действий необходимо обеспечить обмен информацией между автоматическими агентами. Этот вопрос также затронут в статье.

Ключевые слова: безэкипажное судно, кооперативное маневрирование, предупреждение столкновений, МППСС-72.

Для цитирования:

Смоленцев С. В. Кооперативное маневрирование безэкипажных судов для безопасного расхождения в море / С. В. Смоленцев, А. Е. Сазонов Ю. М. Искандеров // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2018. — Т. 10. — № 4. — С. 687–695. DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-4-687-695.

Введение (Introduction)

Одной из современных концепций развития морского судоходства является концепция безэкипажного судна. Разработка безэкипажного судна ставит новые задачи в области обеспечения безопасности мореплавания и, в частности, такой важной ее составляющей, как обеспечение безопасного расхождения судов в море.

Проблема безопасного расхождения судов в море является одной из классических проблем судовождения. В XX в. для ее решения была принята Конвенция о Международных правилах предупреждения столкновений судов в море, приложением к которой, собственно, и являются Правила МППСС-72 [1]. Выполнение Правил МППСС-72 является обязательным для гражданских судов, однако их применение не гарантирует безопасности мореплавания ввиду следующих причин:

- не учитывают навигационных ограничений в районе плавания;
- регламентируют расхождение двух судов, но не применимы в случае встречи нескольких судов.

Тем не менее МППСС и в настоящее время являются основным инструментом для обеспечения безопасного расхождения судов в море. Однако этот документ определяет принципы и основные правила поведения судоводителей в различных ситуациях встречи судов, но не дает четких указаний и не предписывает конкретных маневров для расхождения. Поэтому конкретные действия судоводителей для безопасного расхождения в реальных условиях встречи судов в море диктуются не только МППСС, но и «хорошей морской практикой», которая для каждого судоводителя определяется его собственным опытом. Таким образом, человеческий фактор является ключевым при традиционном решении задачи безопасного расхождения в море.

Автоматизация процессов управления — единственный путь ослабления влияния человеческого фактора и конечной стадией этого процесса является переход к безэкипажным судам. В литературе [2] – [10] большое внимание уделяется различным вопросам автоматизации процессов расхождения.

Основные принципы построения интеллектуальных систем управления изложены в работе [2]. Вопросы формализации МППСС-72 рассмотрены в работе [5]. Работы Л. Л. Вагущенко [6], [7] посвящены использованию интеллектуальных систем в навигации, в том числе и при решении задач расхождения судов. Траекторный подход к решению задачи безопасного расхождения судов, учитывающий требования МППСС-72, предложен в работах [8] – [10].

Переход к безэкипажным судам приводит к тому, что вместо судоводителя (ЛПР — лица, принимающего решения) управление судном осуществляет автомат (АПР — автомат, принимающий решения). Это кардинально меняет постановку задачи обеспечения безопасного расхождения судов в море, а именно:

- решение принимается в автоматическом режиме;
- исключается влияние человеческого фактора;
- возможно принятие кооперативных решений несколькими АПР.

В данной статье рассматривается третий указанный аспект, а именно проблема принятия кооперативных решений группой АПР для безопасного расхождения группы судов, управляемых этими АПР.

Для выработки коллективного решения группой автоматов может быть использована *теория мультиагентных систем* (МАС). Подобный подход к решению данной проблемы был предложен автором в работе [11]. В данной статье этот подход будет дополнен результатами, опубликованными в работах [12] – [14].

Методы и материалы (Methods and Materials)

В работе рассматривается задача совместного маневрирования группы судов с целью их безопасного расхождения и принципы ее решения. Эта задача возникает в районах интенсивного судоходства, когда ситуация опасного сближения может создаваться более чем для двух судов либо попытка маневрирования судна во избежание столкновения может приводить к опасному сближению с другими судами. В подобных ситуациях несколько судов должны совершить согласованные маневры, чтобы привести к безопасному расхождению всех судов в группе.

Постановка задачи

Рассмотрим множество U судов в заданной акватории. В нем может быть определено подмножество (группа) судов G , в котором находятся объекты трех классов:

- класс A — суда, которые идут опасно с другими судами, но не могут маневрировать, из-за их привилегий в соответствии с МППСС-72 или других причин;
- класс B — суда, которые идут опасно с другими судами и обязаны маневрировать;
- класс C — суда, которые не представляют опасности для других судов, но могут маневрировать.

Соответственно $G = A \cup B \cup C$.

Кроме того, в акватории могут находиться другие суда (класса D). Ни одно из судов группы D не идет опасно относительно любых судов в акватории. В противном случае эти суда также включаются в группу G . Суда, не включенные в группу G , выступают как ограничения для решений, принимаемых для судов данной группы. С каждым судном связан агент, управляющий этим судном (либо ЛПР, либо АПР). У каждого агента существует своя целевая функция — заданный маршрут следования судна в данной акватории.

Действиями агентов необходимо разрешить конфликт, т. е. предотвратить опасное сближение судов внутри группы G . Для этого нужно изменить маршруты судов внутри группы так, чтобы между ними не возникала ситуация опасного сближения и при этом минимизировалось общее отклонение всех маршрутов судов в группе от начальных.

Результаты (Results)

Для обеспечения безопасности мореплавания в заданной акватории необходимо прежде всего детектировать наличие опасности для судов, т. е. определить наличие конфликта в группе всех судов в акватории, а уже затем, в случае наличия этого конфликта, находить решение, способное его разрешить. Таким образом, общий алгоритм должен быть следующим (см. рисунок):

1. Из множества всех судов в акватории выделяется группа судов G , в которой существует конфликт — опасное сближение.
2. Найденная группа делится на два множества: A и B . Множество $C = \emptyset$, множество D — все остальные суда в акватории.
3. Проводится поиск решения в группе за счет возможного маневрирования судов из множества $B \cup C$.
4. Если решение найдено, переходим к пп. 6.

5. В случае отсутствия решения из множества D выбирается судно, которое включается в множество C . В случае, если $D = \emptyset$, и решение не найдено, необходим выход, в противном случае — переход к пп. 3

6. Вывод решения.

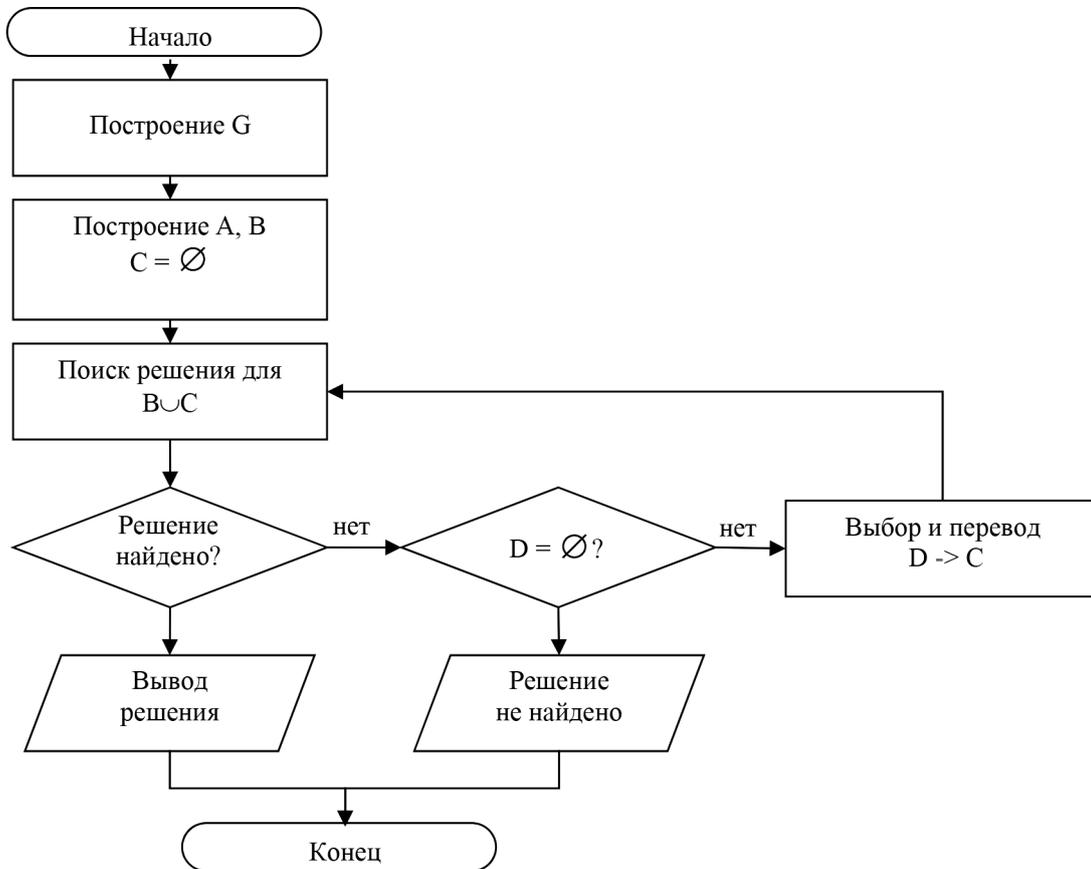


Схема алгоритма

Рассмотрим отдельные подзадачи, решаемые при реализации разработанного алгоритма.

1. Построение множества G . Первоначально в множество G входят суда, для которых существует ситуация опасного сближения. Для построения этого множества необходимо оценить для каждого из судов из множества U опасность сближения с остальными судами. В случае детектирования ситуации опасного сближения в множество G включается как само это судно, так и суда, с которыми определена ситуация опасного сближения.

Решение задачи оценки опасного сближения для одного судна с другими судами предложено в работе [13]. Для группы судов оно может быть расширено следующим образом.

Для каждого судна $u \in U$ строят $S_i^e(u)$ — оценку навигационной ситуации.

Оценка навигационной ситуации производится на основе прогноза развития навигационной ситуации и имеющейся информации о районе плавания:

$$S_i^e = \langle e(Tr_0), \{e(Tr_0 \circ Tr_j)\}_{j \in J} \rangle = E(S_i^f, \mathbf{R}, K_e),$$

где S_i^f — прогноз навигационной ситуации; \mathbf{R} — статическая составляющая навигационной ситуации (информация о районе плавания и заданном маршруте данного судна); K_e — знания об оценках навигационных ситуаций.

Прогноз навигационной ситуации S_i^f строится на основе прогнозов траекторий движения всех судов из множества U на заданный промежуток времени:

$$S_i^f = \langle Tr_0, \{Tr_j\}_{j \in J} \rangle = F(S_{-1}, \mathbf{R}, M, K_f),$$

где Tr_0 — прогноз траектории данного судна; Tr_j — прогноз траектории судна-цели; $S_{-1} = \{S_t\}_{t \in [-T, -1]}$ — последовательность векторов предшествующих навигационных ситуаций; M — множество моделей динамики судов из множества U ; K_f — знания о прогнозировании траектории с учетом ограничений.

Для построения прогнозов траекторий всех судов необходимо использовать их динамические характеристики. При расчете траекторий также учитывается район плавания (ограничения, накладываемые глубинами, специальными районами, а также рекомендованные маршруты).

При решении задачи оценки навигационной ситуации в качестве значимых факторов приняты следующие риски для каждого из судов:

- риск столкновения с другими судами,
- риск выхода на мелководье,
- риск выхода на навигационные опасности,
- риск выхода в зоны, запретные для плавания.

Для оценки риска столкновения с другими судами проводится попарная проверка безопасности прогнозируемой траектории каждого судна с прогнозируемыми траекториями других судов из множества U . При этом оцениваются стандартные параметры: время и дистанция кратчайшего сближения, которые формируют множество параметров оценок риска (J — множество судов-целей $J = U/u$, где u — выбранное судно):

$$P^s = \{P_j^s\}_{j \in J};$$

$$P_j^s = \langle D_{kj}(Tr_0 \circ Tr_j), T_{kj}(Tr_0 \circ Tr_j) \rangle.$$

Аналогичным образом строится множество параметров оценки риска выхода на мелководье, выхода в запретные зоны и на навигационные опасности. Для этого определяются время и дистанция кратчайшего сближения с соответствующей навигационной опасностью (L — множество навигационных опасностей и ограничений в районе плавания):

$$P^N = \{P_l^N\}_{l \in L};$$

$$P_l^N = \langle D_{kl}(Tr_0 \circ Nav_l), T_{kl}(Tr_0 \circ Nav_l) \rangle.$$

Объединив полученные множества, получаем общее множество параметров оценок риска для каждого судна из множества U :

$$P = P^s \cup P^N = \{P_i\}_{i \in I}.$$

Для оценки степени опасности каждого из объектов объединенного множества I используется шкала из трех категорий RYG = <RED><YELLOW><GREEN> (<опасно><внимание><безопасно>). Каждый потенциально опасный объект (судно-цель, навигационный объект) относится к одной из категорий в зависимости от установленных зон безопасности судна, рассчитанных параметров кратчайшего сближения, а также динамики изменения этих параметров. Для этого вводятся две зоны: *опасная зона* (сближение на дистанцию менее D^* считается опасным и его следует избегать) и *зона усиленного внимания* (сближение на дистанцию менее D^{**} , но более D^* считается потенциально опасным и требует внимания со стороны судоводителя). Кроме того, вводится время T^* — «горизонт» учета опасных событий. Параметры T^* , D^* и D^{**} существенно зависят от текущих условий плавания и характеристик собственного судна и должны устанавливаться судоводителем. Отнесение каждого из опасных объектов к одной из категорий производится по следующим правилам:

$$(D_{ki} > D^{**}) \rightarrow Q_i = GREEN;$$

$$(D_{ki} > D^*) \& (D_{ki} > 0) \rightarrow Q_i = GREEN;$$

$$(D_{ki} > D^*) \rightarrow Q_i = YELLOW;$$

$$(D_{ki} \leq D^*) \& (T_{ki} > T^*) \rightarrow Q_i = YELLOW;$$

$$(D_{ki} \leq D^*) \& (\dot{D}_{ki} > 0) \rightarrow Q_i = YELLOW;$$

$$(D_{ki} \leq D^*) \rightarrow Q_i = RED.$$

Приведенные правила применяются по порядку сверху вниз и при выполнении какого-либо из условий определяют значение критерия, и проверку следующих условий не проводят. Таким образом, оценку безопасности для каждого навигационного объекта или судна-цели получают по определенной выше шкале риска:

$$e(Tr_0) = \min(Q_i), l \in L;$$

$$e(Tr_0 \circ Tr_j) = Q_j, j \in J.$$

Комплексная оценка безопасности определяется по наиболее опасному объекту:

$$S_i^e = \min(e(Tr_0), \{e(Tr_0 \circ Tr_j)\}_{j \in J}).$$

Таким образом, для каждого из судов $u \in U$ строится комплексная оценка безопасности — $S_i^e(u)$. Значение этой оценки является критерием для включения судна в множество G :

$$G = \{u \in U, S_i^e(u) = RED\}.$$

2. Распределение обязанностей внутри группы G. Все суда, попавшие в группу G , находятся в ситуации опасного сближения с другими судами из этой же группы. В общем случае множество G может распадаться на несколько подмножеств, в каждом из которых находятся суда, опасно сближающиеся с другими судами этого подмножества, но не опасные для судов из других подмножеств: $G = \bigcup G_i$. Однако в данной статье будет рассматриваться упрощенный случай — наличие только одного такого подмножества. Т. е. все суда, включенные в множество G , опасно сближаются друг с другом.

Все суда из множества G делятся на два класса по отношению к обязанностям по маневрированию с целью предупреждения столкновения.

К классу A относятся суда, которые являются привилегированными по отношению к другим судам из множества G и им должны уступать дорогу другие суда. Такая привилегия возникает либо вследствие статуса судна (суда, стесненные своей осадкой, занятые ловом рыбы, ограниченные в маневрировании и т. п.), либо вследствие их взаимного положения в ситуации встречи с другими судами. В любом случае это регламентируется МППСС-72 и может быть легко формализовано.

К классу B относятся все остальные суда из множества G : $B = G/A$. Суда из этого множества обязаны предпринять маневр для разрешения ситуации опасного сближения всех судов в группе G .

3. Поиск оптимального решения внутри группы G. Поиск решения осуществляется для судов из множества $B \cup C$. Изначально множество C — пустое и поиск решения проводится только при использовании судов из множества B . Однако это не всегда приводит к успеху, т. е. маневрированием только судов из множества B задача обеспечения безопасного расхождения не решается. В этом случае из множества D выбираются суда, изначально находящиеся в состоянии безопасного движения и включаются в состав множества C . Процедура поиска решения и (при необходимости) пополнения множества C повторяется до тех пор, пока решение не будет найдено.

Искомым решением является набор новых маршрутов для судов из множества $B \cup C$, приводящих к разрешению конфликта, т. е. безопасному расхождению всех судов в группе. Кроме того, движение по новым маршрутам не должно приводить к возникновению ситуации опасного сближения с судами из множества D , которые изначально находились в безопасной ситуации. Та-

ким образом, множество D является ограничением при выборе решений. Принципы и алгоритмы решения задачи расхождения для одного судна изложены в [14]. В данном случае необходимо расширить этот алгоритм на несколько судов из множества $B \cup C$.

Критериями оптимизации общего решения являются: минимум количества судов из множества $B \cup C$, маршруты которых изменяются, а также минимум суммы отклонений всех новых маршрутов от планируемых ранее для тех судов, маршруты которых изменяются.

4. Выбор судна из множества D для включения в множество C . Как отмечалось ранее, при поиске решений для судов в текущей конфигурации множества $B \cup C$ возможна ситуация отсутствия решения. Причинами этого могут быть ограничения на возможные маневры со стороны судов из множества D . Эти суда безопасно движутся по своим маршрутам и не влияют на уровень опасности столкновения для судов из множества G , однако некоторые маневры судов из множества $B \cup C$ приводят к ситуации опасного сближения с этими судами и поэтому удаляются из множества решений. Это может привести к тому, что множество решений оказывается пустым.

Выход из этой ситуации возможен путем ослабления ограничений, т. е. перевода судов из множества D в множество C . В этом множестве находятся суда, которые изначально движутся безопасно относительно остальных судов в акватории (иначе они бы принадлежали множеству $A \cup B$), однако без их маневрирования невозможно решить общую задачу обеспечения безопасности для группы G . Очевидно, что следует стремиться к минимизации количества элементов множества C . Изначально это множество пустое. И только при отсутствии решения в это множество необходимо перевести из множества D одно судно и проверить возможность построения нового решения. Таким образом, можно построить итеративный алгоритм поиска решения при условии пополнения множества C судами из множества D и тем самым ослабления ограничений при поиске решения.

Таким образом, важным является выбор судна из множества D для перемещения в множество C . Для этого определяют те суда из множества D , которые ограничивают выполнение маневров судами из множества $B \cup C$, приводящих к разрешению конфликта. Эти суда и являются «кандидатами» для включения их в множество C . При этом надо проверить, не попадет ли это судно в множество A при включении его в данную группу. В данном случае данное судно не должно включаться в группу, поскольку это не приведет к разрешению конфликта (судно не сможет маневрировать).

Обсуждение (Discussion)

Реализация предложенного в статье подхода к решению задачи обеспечения безопасности мореплавания возможна только в среде безэкипажных судов. В этом случае задача решается совместно агентами, управляющими судами в заданной акватории, либо одним агентом, которому делегируется функция обеспечения безопасности в данной акватории (например, эту функцию выполняет система управления движением судна — СУДС).

Для решения задачи безопасного расхождения судов в море, в соответствии с разработанным алгоритмом, необходимо обеспечить обмен информацией между агентами, управляющими этими судами. Прежде всего, это данные о планируемых маршрутах и параметрах динамики судов. Эта информация используется для построения прогнозов траекторий движения судов в задачах оценки безопасности и поиска решений по расхождению. Кроме того, необходим обмен между агентами полученными решениями для проведения согласованных маневров по расхождению.

Выводы (Summary)

1. В статье изложены основные принципы решения задачи кооперативного маневрирования для обеспечения безопасного расхождения судов в море. Предложенный алгоритм позволяет находить решение в виде измененных маршрутов судов, приводящее к безопасному расхождению группы судов с учетом их динамики, навигационных ограничений и Правил МППСС-72. Найден-

ное решение позволяет не только обеспечить безопасное расхождение группы судов, но и минимизирует количество судов, изменяющих маршрут своего движения, а также минимизирует эти изменения.

2. Задача решается агентами, управляющими судами в автоматическом режиме. Таким образом, обеспечивается безопасное расхождение безэкипажных судов в заданной акватории. Однако открытым остается вопрос взаимодействия безэкипажных судов, управляемых АПР (агентами) с судами, управляемыми ЛПП (судоводителями). Эта проблема требует дополнительного исследования.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Международные правила предупреждения столкновений судов в море 1972 г. (МППСС-72). — 5-е изд. — М.: Моркнига, 2011. — 142 с.
2. Васильев С. Н. Интеллектуальное управление динамическими системами / С. Н. Васильев [и др.]. — М.: Физматлит, 2000. — 352 с.
3. Johansen T. A. Ship collision avoidance and COLREGS compliance using simulation-based control behavior selection with predictive hazard assessment / T. A. Johansen, T. Perez, A. Cristofaro // IEEE transactions on intelligent transportation systems. — 2016. — Vol. 17. — Is. 12. — Pp. 3407–3422. DOI: 10.1109/TITS.2016.2551780.
4. Woerner K. L. Collision avoidance road test for colregs-constrained autonomous vehicles / K. L. Woerner, M. R. Benjamin, M. Novitzky, J. J. Leonard // OCEANS 2016 MTS/IEEE Monterey. — IEEE, 2016. — Pp. 1–6. DOI: 10.1109/OCEANS.2016.7761413.
5. Цымбал Н. Н. Формализация МППСС-72 в части координации взаимодействия судов при расхождении / Н. Н. Цымбал, Р. Ю. Бужбецкий // Судовождение. — 2006. — № 12. — С. 124–129.
6. Вагущенко Л. Л. Поддержка решений по расхождению с судами / Л. Л. Вагущенко, А. Л. Вагущенко. — Одесса: Феникс, 2010. — 229 с.
7. Вагущенко Л. Л. Мультиагентный подход к решению задач расхождения судов / Л. Л. Вагущенко, А. Л. Вагущенко // Судовождение. — 2008. — № 15. — С. 35–43.
8. Dmitriev S. P. Safety Measures for a Ships Passing Track in the Multiagent Framework / S. P. Dmitriev, N. V. Kolesov, A. V. Osipov // IFAC Proceedings Volumes. — 2000. — Vol. 33. — Is. 21. — Pp. 373–377. DOI: 10.1016/S1474-6670(17)37103-3.
9. Дмитриев С. П. Автоматический синтез траекторий движения как средство интеллектуальной поддержки судоводителя / С. П. Дмитриев и [др.] // Гирскопия и навигация. — 2001. — № 3 (34). — С. 19–31.
10. Дмитриев С. П. Система интеллектуальной поддержки судоводителя при расхождении судов / С. П. Дмитриев, Н. В. Колесов, А. В. Осипов, Г. Н. Романычева // Известия Российской академии наук. Теория и системы управления. — 2003. — № 2. — С. 98–105.
11. Смоленцев С. В. Формализация задачи расхождения судов в море на основе теории мультиагентной системы / С. В. Смоленцев // Эксплуатация морского транспорта. — 2011. — № 2. — С. 19–24.
12. Смоленцев С. В. Концепция автоматизированной интеллектуальной системы расхождения судов / С. В. Смоленцев [и др.] // Эксплуатация морского транспорта. — 2012. — № 4 (70). — С. 11–14.
13. Смоленцев С. В. Проблема оценки навигационной ситуации в море / С. В. Смоленцев // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2015. — № 6 (34). — С. 23–28. DOI: 10.21821/2309-5180-2015-7-6-23-28.
14. Смоленцев С. В. Автоматический синтез решений по расхождению судов в море / С. В. Смоленцев // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2016. — № 2 (36). — С. 7–16. DOI: 10.21821/2309-5180-2016-8-2-7-16.

REFERENCES

1. *Mezhdunarodnye pravila preduprezhdenija stolknovenij sudov v more 1972 g. (MPPSS-72)*. 5 ed. M.: Morkniga, 2011.
2. Vasilev, S.N., A.K. Zherlov, E.A. Fedosov, et al. *Intellektualnoe upravlenie dinamicheskimi sistemami*. M.: Fizmatlit, 2000.

3. Johansen, Tor Arne, Tristan Perez, and Andrea Cristofaro. "Ship collision avoidance and COLREGS compliance using simulation-based control behavior selection with predictive hazard assessment." *IEEE transactions on intelligent transportation systems* 17.12 (2016): 3407–3422. DOI: 10.1109/TITS.2016.2551780.
4. Woerner, K.L., M.R. Benjamin, M. Novitzky, and J.J. Leonard. "Collision avoidance road test for colregs-constrained autonomous vehicles." *OCEANS 2016 MTS/IEEE Monterey*. IEEE, 2016. 1–6. DOI: 10.1109/OCEANS.2016.7761413.
5. Cymbal, N.N., and R.Ju. Buzhbeckij. "Formalizacija MPPSS-72 v chasti koordinacii vzaimodejstvija sudov pri rashozhdenii." *Sudovozhdenie* 12 (2006): 124–129.
6. Vagushhenko, L.L., and A.L. Vagushhenko. *Podderzhka reshenij po rashozhdeniju s sudami*. Odessa: Feniks, 2010.
7. Vagushhenko, L.L., and A.L. Vagushhenko. "Multiagentnyj podhod k resheniju zadach rashozhdenija sudov." *Sudovozhdenie* 15 (2008): 35–43.
8. Dmitriev, S.P., N.V. Kolesov, and A.V. Osipov. "Safety Measures for a Ships Passing Track in the Multiagent Framework." *IFAC Proceedings Volumes* 33.21 (2000): 373–377. DOI: 10.1016/S1474-6670(17)37103-3.
9. Dmitriev, S.P., N.V. Kolesov, A.V. Osipov, and G.N. Romanycheva. "Avtomaticeskij sintez traektorij dvizhenija kak sredstvo intellektual'noj podderzhki sudovoditelja." *Gyroscopy and Navigation* 3(34) (2001): 19–31.
10. Dmitriev, S.P., N.V. Kolesov, A.V. Osipov, and G.N. Romanycheva. "System of intelligent support of a ship navigator for collision avoidance." *Journal of Computer and Systems Sciences International* 42.2 (2003): 256–263.
11. Smolentsev, S.V. "Formalization of the ships' collision avoidance at sea on the basis of MAS theory." *Ekspluatatsiya morskogo transporta* 2 (2011): 19–24.
12. Smolentsev, S.V., B.V. Afanasiev, A.E. Filyakov, and D.V. Kunits. "Concept of automated intelligent system for ships collision avoidance." *Ekspluatatsiya morskogo transporta* 4(70) (2012): 11–14.
13. Smolentsev, Sergey Victorovich. "The problem of estimation of navigation situation in the sea." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova* 6(34) (2015): 23–28. DOI: 10.21821/2309-5180-2015-7-6-23-28.
14. Smolentsev, Sergey Victorovich. "Automatic synthesis of decisions on vessels collision avoidance at sea." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova* 2(36) (2016): 7–16. DOI: 10.21821/2309-5180-2016-8-2-7-16.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Смоленцев Сергей Викторович —
 доктор технических наук, профессор
 ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала
 С. О. Макарова»
 198035, Российская Федерация, Санкт-Петербург,
 ул. Двинская, 5/7
 e-mail: sswasily@mail.ru, SmolencevSV@gumrf.ru
Сазонов Анатолий Ефимович —
 доктор технических наук, профессор
 ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала
 С. О. Макарова»
 198035, Российская Федерация, Санкт-Петербург,
 ул. Двинская, 5/7
 e-mail: kaf_avt@gumrf.ru
Искандеров Юрий Марсович —
 доктор технических наук, профессор
 Санкт-Петербургский институт информатики
 и автоматизации Российской академии наук
 199178, Российская Федерация, Санкт-Петербург,
 14-я линия, д. 39
 e-mail: iskanderov_y_m@mail.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Smolentsev, Sergey 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: sswasily@mail.ru, SmolencevSV@gumrf.ru
Sazonov, Anatolii E. —
 Dr. of Technical Sciences, professor
 Admiral Makarov State University of Maritime
 and Inland Shipping
 5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg 198035,
 Russian Federation
 e-mail: kaf_avt@gumrf.ru
Iskanderov, Yurii M. —
 Dr. of Technical Sciences, professor
 St. Petersburg Institute for Informatics and Automation
 of the Russian Academy of Sciences
 39 14-th Linia VI Str., St. Petersburg, 199178,
 Russian Federation
 e-mail: iskanderov_y_m@mail.ru

Статья поступила в редакцию 16 июля 2018 г.
 Received: July 16, 2018.

DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-4-696-704

HEINRICH'S LAW: EXPANSION OF RISK ASSESSMENT MATRIX INTO HUMAN FACTOR AREA

V. A. Loginovsky

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

The requirements of risk assessment and management in ship operations, being introduced by the International Safety Management Code, Maritime Labor Convention 2006, as well as by the Manila Amendments 2010 to 1978 International Convention on Training, Certification and Watchkeeping for Seafarers and its associated Code, should be considered as effective solutions made by the International Maritime Organization and International Labor Organization, which designed improve safety at sea and protection of the marine environment, as well as, without a doubt, to raise the quality of seafarers.

Risk assessment, as a process that precedes decision-making in ship operations, plays a significant role in motivating a deeper study of all aspects of professional competencies, and requires quality training both ashore and on board the ship. Otherwise, inadequate and unprofessional risk assessment in ship operations executed by ship officers, might be the cause of a wrong decision that can do harm.

In risk assessment and risk management processes, the essential role is assigned to the Human Factor, which currently is the main cause of all accidents at sea. Due to the difficulty of formalization the Human Factor, it is not included in ship's risk assessment matrices, although it is the cause of most accidents. Formalization of the Human Factor within its influence on risk assessment is possible either using probabilistic mechanisms or qualitative approaches and both of them, undoubtedly introduce additional difficulties for the seafarer in adequate perception and understanding of the essence of risk.

The paper proposes method of expanding the risk assessment matrix into the Human Factor area. This expansion is based on a combination of formal safety assessment methodology applied by International Maritime Organization and statistical proportions, known as Heinrich's Law. The risk assessment matrix is expanded by two categories of consequences of incidents, as "mental tension" and "stress", which appear in humans on the basis of the awareness of such situations as "unsafe working conditions, unsafe acts" and "near miss incidents".

Keywords: risk, Heinrich's Law, Human Factor, unsafe conditions, unsafe acts, near miss incidents.

For citation:

Loginovsky, Vladimir A. "Heinrich's law: expansion of risk assessment matrix into human factor area." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 10.4 (2018): 696–704. DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-4-696-704.

УДК 656.61.052 656

ЗАКОН ХАЙНРИХА: РАСШИРЕНИЕ МАТРИЦЫ ОЦЕНКИ РИСКА В ОБЛАСТЬ ЧЕЛОВЕЧЕСКОГО ФАКТОРА

В. А. Логиновский

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

Требования оценки и управления риском в судовых операциях, введенные Международным Кодексом по управлению безопасностью и защитой природной среды, Конвенцией о труде в морском судоходстве 2006 г., а также Манильскими поправками 2010 г. в Конвенцию и Кодекс по подготовке, дипломированию моряков и несению вахты следует рассматривать как эффективные решения Международной морской организации и Международной организации труда, призванные повысить уровень безопасности на море и защиты морской среды, а также повысить качество подготовки морских специалистов. Оценка риска как процесс, предваряющий принятие решений в судовых операциях, играет существенную роль в мотивации более глубокого изучения всех аспектов профессиональных компетенций, а также требует качественной практической подготовки как в учебном заведении, так и на судне. В противном случае неадекватная

и непрофессиональная оценка риска в судовых операциях, выполняемая командным составом, за которым следует неправильное решение, может принести вред. В оценке и управлении риском существенная, если не основная, роль отводится человеческому фактору, который в настоящее время является основной причиной аварийности на море. В связи с трудностью формализации человеческий фактор не включается в судовые матрицы оценки риска. Формализация же человеческого фактора в рамках его влияния на оценку риска возможна либо с использованием вероятностных механизмов, либо с помощью качественных подходов, что, несомненно, вносит дополнительные трудности для моряка в адекватном восприятии и понимании сущности риска.

В статье предлагается метод расширения матрицы оценки риска в область человеческого фактора на основе комбинации подхода, применяемого в Международной морской организации, для формализованной оценки безопасности и статистических зависимостей, известных как закон Хайнриха. В матрицу оценки риска вводятся такие категории тяжести последствий происшествия, как «ментальное напряжение» и «стресс», возникающие у человека на основе осознания «небезопасных условий работы», «небезопасных действий» и «потенциально опасных ситуаций».

Ключевые слова: риск, закон Хайнриха, человеческий фактор, небезопасные условия, небезопасные действия, потенциально опасные ситуации.

Для цитирования:

Логиновский В. А. Закон Хайнриха: расширение матрицы оценки риска в область человеческого фактора / В. А. Логиновский // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2018. — Т. 10. — № 4. — С. 696–704. DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-4-696-704.

Введение (Introduction)

Несмотря на развитие технических средств навигации, средств и методов подготовки плавсостава судов, совершенствование технологий постройки судов, аварийность на море продолжает оставаться на достаточно высоком уровне. Одной из превентивных мер, направленных на снижение количества морских происшествий, является введение в мореплавании механизма оценки и управления риском в судовых операциях, который регламентируется многими международными инструментами, включая такие конвенции, как Международная Конвенция по охране человеческой жизни на море (СОЛАС-74), Конвенция по подготовке, дипломированию моряков и несению вахты (ПДНВ-78), Конвенция о труде в морском судоходстве (КТМС-2006), а также ряд других международных стандартов.

Необходимо отметить, что наиболее значимой причиной аварийности на море является человеческий фактор [1], а психологическое состояние моряков является его неотъемлемой составляющей. На рис. 1 в процентах показана статистика влияния человеческого фактора, а именно ошибок человека, на различные происшествия в мореплавании [2]. В документе [1] содержатся важные рекомендации по его учету, но *человеческий фактор* трудно поддается формализации, поэтому разработка прямой адекватной модели психологического состояния и поведения человека в различных ситуациях не является простой задачей. Если следовать стандартному алгоритму оценки риска и не использовать специальную технологию психологического тестирования, то в качестве альтернативы возможно применение косвенных вероятностных, но достаточно обобщенных подходов для постановки такой задачи.

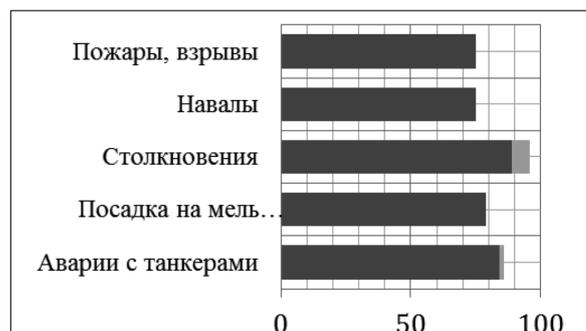


Рис. 1. Влияние ошибок человека на аварийность в мореплавании

Одной из основ для построения матрицы риска с учетом человеческого фактора может быть закон Хайнриха, согласно которому число происшествий обратно пропорционально тяжести последствий от них. Эта формулировка приводит к выводу о том, что сведение к минимуму числа незначительных происшествий в среднем приведет к уменьшению вероятности (частоты) возникновения крупных аварий, т. е. к снижению риска. Формулировка закона интуитивно понятна и не вызывает противоречий.

В различных видах деятельности людей используются различные определения термина «риск», а также множество методов его оценки, но в мореплавании в основном применяются методы, основанные на подходах, применяемых в технике. Эти методы описаны в документах Международной морской организации (ИМО) [1], в стандартах Международной организации стандартизации (ИСО) [3] и научных публикациях [4], [5].

Методы и материалы (Methods and Materials)

В документах ИМО риск определяется как комбинация вероятности (частоты) происшествий и тяжести последствий от них, а формула для оценки риска выглядит следующим образом:

$$R = FS, \quad (1)$$

где F — частота, определяется как количество происшествий в единицу времени (например, на судно в год), либо это отношение числа результатов конкретных событий (происшествий) к общему числу возможных событий; S — тяжесть последствий от происшествий за этот же период времени в единицах потерь определенного количества ресурсов (деньги, время, люди и др.).

В текстах судовых документов, которые зачастую составлены на английском языке, не делается особых различий между терминами «вероятность» (probability, likelihood) и «частота» (frequency). Отсутствие математической строгости может быть оправдано наличием существенных неопределенностей в информации, используемой для оценки риска.

Документ [1] рекомендует в качестве инструмента для оценки риска применять упрощенную матрицу, построенную на индексах RI , FI и SI , заменяющих дробные статистические значения R , F и S , что является наиболее приемлемым подходом в процедурах оценки риска на практике, позволяя использовать целые положительные числа вместо десятичных дробей. Причем значения R , F и S округляются с точностью до десятичного разряда, что вполне согласуется с влиянием неопределенностей на оценку параметров риска. Такой подход к представлению R , F и S полностью оправдан для применения в решении сугубо прикладных задач прогноза риска и используется в большинстве судовых форм без интерполяции, с округлением величины риска согласно эмпирическому правилу хорошей морской практики «считай себя ближе к опасности». Для формирования таких индексов применяется логарифмическая шкала, а формула (1) преобразуется в ее логарифмический аналог:

$$\lg(R) + A = \lg(F) + B + \lg(S) + C, \quad (2)$$

где A , B и C — целые положительные числа, при этом $A = B + C$.

Константы A , B и C , в принципе, могут быть любыми целыми числами, так как не меняют величин R , F и S . В документе [1] используются константы, показанные ниже, и тогда соответствующие индексы определяются следующим образом:

$$RI = \lg(R) + A \text{ — индекс риска } (A = 9);$$

$$FI = \lg(F) + B \text{ — индекс частоты } (B = 6);$$

$$SI = \lg(S) + C \text{ — индекс тяжести последствий } (C = 3).$$

В результате индекс риска RI и соответствующий ему риск R оцениваются через индексы частоты и тяжести последствий происшествия следующим образом:

$$RI = FI + SI. \quad (3)$$

После логарифмирования формулы (1) и введения констант полученный индекс частоты FI и его описание представлены в табл. 1, а индекс тяжести последствий SI — в табл. 2.

Таблица 1

Частота происшествий и индекс частоты

FI	Частота F	Описание	F (на судно в год)
7	Часто	Может случаться один раз в месяц на одном судне	10^1
5	Весьма вероятно	Может случаться на десяти судах один раз в год, т. е. может произойти несколько раз за период эксплуатации судна	10^{-1}
3	Вероятно	Может случаться на 1000 судов один раз в год, т. е. может произойти несколько раз за период эксплуатации нескольких подобных судов	10^{-3}
1	Очень маловероятно	Может случаться на 5000 судов за эксплуатационный период в 20 лет	10^{-5}

Таблица 2

Последствия происшествия и индекс тяжести последствий

SI	Тяжесть последствий происшествия	Воздействие на безопасность человека	Воздействие на судно	S (эквивалент фатальных исходов)
1	Незначительные	Одно или малые повреждения	Небольшое повреждение оборудования	10^{-2}
2	Существенные	Многочисленные или серьезные травмы	Нетяжелое повреждение судна	10^{-1}
3	Серьезные	Один фатальный исход или многочисленные тяжелые травмы	Серьезное повреждение	10^0
4	Катастрофические	Многочисленные фатальные исходы	Полная потеря	10^1

Матрица оценки риска, построенная по формуле (3), представлена в табл. 3.

Таблица 3

Матрица оценки риска

Индекс риска RI						
Частота происшествий F и индекс частоты FI			Тяжесть последствий в фатальных исходах (S) и индекс тяжести последствий (SI)			
FI	F (на судно в год)	SI	1	2	3	4
		S	10^{-2} незначительные	10^{-1} существенные	10^0 серьезные	10^1 катастрофические
7	10^1 (часто)		8	9	10	11
6	10^0		7	8	9	10
5	10^{-1} (весьма вероятно)		6	7	8	9
4	10^{-2}		5	6	7	8
3	10^{-3} (вероятно)		4	5	6	7
2	10^{-4}		3	4	5	6
1	10^{-5} (очень маловероятно)		2	3	4	5

Следующие обобщённые критерии широко используются в качестве рекомендованных границ зоны допустимого индивидуального риска в мореплавании, они опубликованы в том же документе [1]: $RI = 3$ ($R = 10^{-6}$) — нижняя граница зоны допустимого индивидуального риска в фатальных исходах (ФИ — fatality) для члена экипажа на судно в год; $RI = 6$ ($R = 10^{-3}$) — верхняя граница

зоны допустимого риска. Между этими границами находится зона индивидуального риска (на столько низкого, насколько это практически возможно), которая называется *зоной допустимого риска* (ALARP — as low as reasonably practicable).

Использование ИМО для оценки риска таких «неделикатных» единиц как «фатальные исходы» можно объяснить самой сутью Конвенции СОЛАС-74, отраженной в ее названии: «Международная Конвенция по охране человеческой жизни на море». В документах ИМО в качестве рекомендации предлагается использовать эквивалент единицы измерения «фатальный исход», предполагающий ее простое соотношение с легкими и тяжелыми травмами (ЛТ, ТТ): 1ФИ = 10 ТТ и 1ТТ = 10 ЛТ. В работе [6] приведены следующие комментарии, поясняющие суть термина: «*Риск не является постоянной, измеримой и реальной сущностью. Количественная оценка риска должна пониматься как оценка, которая выполняется для конкретных моментов времени и является предметом влияния значительных неопределенностей, которые невозможно точно измерить, и чем реже наблюдается событие, тем более катастрофическими последствиями оно обычно характеризуется, и тем менее надежны статистические данные и оценки, полученные на основе этой информации*». Значения F и S , приведенные в табл. 1 – 3, не являются обязательными для оценки и анализа риска. Размерность матрицы риска может быть изменена за счет изменения количества строк и столбцов в зависимости от того, насколько детально компания предполагает различать категории F и S . На судах не рекомендуется применять матрицы размерностью больше, чем 5×5 .

На практике в судовых условиях термины, используемые для определения вероятности (частоты) и тяжести последствий происшествия, могут иметь еще более упрощенную интерпретацию для облегчения их понимания и приложения. Например, термин «вероятность происшествия» может быть выражен как «один раз за рейс», «один раз за год» или «один раз за год для судов компании». Тяжесть последствий от происшествия может интерпретироваться как «необходима первая медицинская помощь», «тяжелая травма», «фатальный исход» и т. д.

Результаты (Results)

Одним из фундаментальных принципов в идеологии судовых систем управления безопасностью (СУБ) является принцип обратной связи, без которого не может быть создан ни один механизм управления. В рамках области оценки рисков этот механизм работает на основе статистического закона Хайнриха, а его применение косвенно регламентируется разд. 9 Международного кодекса по управлению безопасностью (МКУБ). В соответствии с положениями пп. 9.1 – 9.2 данного кодекса «*система управления безопасностью должна включать процедуры, обеспечивающие передачу сообщений Компании о несоответствиях, несчастных случаях и опасных ситуациях, их расследование и анализ с целью совершенствования безопасности и предупреждения загрязнения*». В свою очередь, «компания должна установить процедуры по выполнению корректирующих действий, включая меры, направленные на предупреждение повторений». Как видим, алгоритм обратной связи, регламентируемый в МКУБ, по своей структуре ничем, кроме терминологии, не отличается от алгоритмов системы управления качеством.

Закон Хайнриха определяет обобщенную статистическую связь между такими категориями опасностей как «небезопасные условия», «небезопасные действия» и «потенциально-опасные ситуации» (ПОС) с прогнозом частоты (вероятности) реального происшествия и тяжести его последствий. В информационных ресурсах не публикуется достаточное количество профессиональной статистики о прямых последствиях психологической усталости для тех моряков, которые многократно испытывали такие опасности (например, опасность посадки судна на грунт или опасность столкновения) или многократно попадали в другие потенциально опасные ситуации, а поэтому для анализа использовалась косвенная информация.

В табл. 4 и 5 приведены заимствованные из документов [7], [8] примеры ситуаций, возникающих во время несения ходовой навигационной вахты, и их причины, описанные капитанами, лоцманами и вахтенными помощниками (более 2000 ответов).

Таблица 4

Потенциально опасные ситуации, %

1	Я чувствую неожиданную опасность из-за маневрирования другого судна	32%
2	Мое судно находится очень близко к другому судну, бую или какому-либо препятствию	17
3	Возможность маневрирования сильно ограничена из-за близости другого судна	16
4	Основное оборудование (главный двигатель, рулевое устройство, радар) не работает	12
5	Направление движения и скорость моего судна не соответствуют моим ожиданиям	7
6	Направление движения и скорость моего судна не поддаются контролю	7
7	Мое судно приблизилось к рифу или мелководью	5
8	Другое	4

Таблица 5

Причины возникновения потенциально опасных ситуаций, %

1	Судно-цель нарушило правила маневрирования	23
2	Судно-цель не обнаружило мое судно	15
3	Дрейф судна вследствие влияния сильного прилива	9
4	Ошибка в определении направления	9
5	Концентрация внимания не на должном объекте	7
6	Судно-цель не несло ходовые огни	5
7	Сбой в запуске двигателя	4
8	Запоздалое понимание ситуации из-за выполнения других работ	4
9	Сбой в работе рулевого устройства	3
10	Цель не была обнаружена радаром	3
11	Некорректное переключение режимов работы приборов	2
12	Судно-цель не идентифицировано из-за налетевшего шквала	2
13	Сбой в работе компаса	1
14	Неправильная настройка авторулевого	1
15	Некорректная настройка радара	1
16	Сбой в работе радара	1
17	Некорректная настройка САРП	1
18	Цель не была обнаружена САРП	1
19	Другое	8

Графическая иллюстрация закона Хайнриха описывает четыре уровня происшествий и показана на рис. 2. Эти уровни I – IV в интерпретации компании *NYK* приведены в документе [9] с точностью до десятичного разряда, т. е. аналогично определению параметров *F* и *S* в матрице оценки риска. Причем ряд судоходных компаний тоже применяют статистические зависимости, основанные на законе Хайнриха, но используют другие пропорции, адекватные их структуре, виду деятельности, а также численности и типу судов, находящихся в эксплуатации.

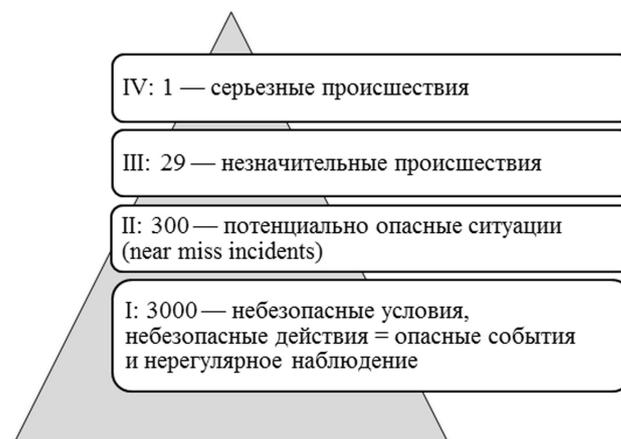


Рис. 2. Уровни закона Хайнриха

Для сохранения адекватности представлению данных в матрице риска (см. табл. 3) до десятичного разряда необходимо, чтобы указанные в формуле (2) константы имели следующие минимальные значения: $A = 11$; $B = 6$; $C = 5$. В результате введения этих констант, расширенная матрица оценки риска будет выглядеть следующим образом (табл. 6).

Таблица 6

Расширенная матрица оценки риска

Индекс риска RI								
Частота происшествий F и индекс частоты FI		Тяжесть последствий в фатальных исходах (S) и индекс тяжести последствий (SI)						
FI	F (на судно в год)	SI	1	2	3	4	5	6
		S	10^{-4} психологическое напряжение	10^{-3} стресс	10^{-2} незначительные	10^{-1} существенные	10^0 серьезные	10^1 катастрофические
7	10^1 (часто)		8	9	10	11	12	13
6	10^0		7	8	9	10	11	12
5	10^{-1} (весьма вероятно)		6	7	8	9	10	11
4	10^{-2}		5	6	7	8	9	10
3	10^{-3} (вероятно)		4	5	6	7	8	9
2	10^{-4}		3	4	5	6	7	8
1	10^{-5} (очень маловероятно)		2	3	4	5	6	7
Уровни закона Хайнриха			I — небезопасные условия и действия	II — ПОС	III — незначительные происшествия	IV — серьезные происшествия		

В нижней строке расширенной матрицы риска показаны уровни закона Хайнриха в соответствии с работой [9]. Уровни I и II введены простым способом линейной экстраполяции индекса тяжести последствий происшествия SI области небезопасных условий и действий и потенциально опасных ситуаций.

Обсуждение (Discussion)

Ситуации на уровнях I и II не приводят непосредственно к авариям и катастрофам, но они оказывают влияние на вероятность (частоту) их возникновения, что при определенной «критической массе» таких ситуаций, распределенных в конкретном интервале времени, может привести к психологическому (ментальному) напряжению моряков (см. табл. 4 и 5). Если ситуации на уровнях I и II происходят часто, то можно предположить, что это может вызвать повышенное психологическое напряжение и стресс, а это, в свою очередь, может повысить уровень риска в судовых операциях. Следует также отметить, что, несмотря на требование МКУБ, компания может не иметь достаточной информации о ситуациях на уровнях I и II, так как фактического ущерба (потерь ресурсов) от таких происшествий не происходит, и экипаж зачастую не сообщает эту информацию в компанию вследствие возникающих психологических барьеров, нарушая принципы «справедливой культуры» [10], а это ведет к повышению риска.

Среди вопросов, требующих профессионального психологического исследования, прежде всего необходимо обратить внимание на интервал времени, в течение которого накапливается критическое психологическое напряжение моряка, переходящее в стресс.

Заключение (Conclusion)

Используемый подход к составлению матрицы риска и его объединение с уровнями I – IV закона Хайнриха, дает основание построить расширенную матрицу риска путем линейной экстраполяции параметра S в область уровней I и II. В принципе, это согласуется с требованием разд. 9 МКУБ о необходимости отправки сообщений об опасных ситуациях на судне в компанию.

Если $RI = 5$ ($R = 10^{-6}$), то это незначительный индивидуальный риск фатальных исходов на судно в год для членов экипажа; если $RI = 8$ ($R = 10^{-3}$) — это максимально допустимый индивидуальный риск. Зона допустимого риска определяется в тех же пределах, что и в матрице-оригинале. Расширенная матрица оценки риска построена на формальных соотношениях, но принципиальные выводы, полученные по двум добавленным столбцам, не противоречат общей логике процессов несения навигационной вахты или любых других судовых операций. Так, например, часто повторяющиеся ситуации на уровне I, что характерно для всех судовых работ, выводят эти работы в зону допустимого риска, но повторяющиеся потенциально-опасные ситуации (уровень II) часто могут создать зону, где риск недопустимо высок.

Таким образом, в результате проведенного аналитического исследования уровни закона Хайнриха интегрированы в матрицу оценки риска, применяемую ИМО в процессе формализованной оценки безопасности, и гармонизированы в соответствии с требованиями МКУБ. В расширенную матрицу оценки риска включены два уровня событий, описанных законом Хайнриха, что позволяет оценивать риск, принимая во внимание как частоту потенциально опасных ситуаций, так и частоту возникновения условий и действий, угрожающих безопасности, т. е. небезопасных условий и небезопасных действий (unsafe conditions, unsafe acts). В матрицу оценки риска введены также такие категории тяжести последствий происшествия, как «ментальное напряжение» и «стресс», возникающие у человека на основе осознания небезопасных условий работы, небезопасных действий и потенциально опасных ситуаций. Расширение матрицы оценки риска в область человеческого фактора на основе включения в нее уровней закона Хайнриха может служить основой для дальнейшего развития методики оценки риска с учетом человеческого фактора.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. MSC-MEPC.2/Circ.12/Rev.1 Revised guidelines for FSA for use in the IMO rulemaking process. — International Maritime Organization, 2015. — 70 p.
2. Strategy, planning and reform: Trends, Developments and Challenges facing the IMO in the 2018-2023 period. — 6 May 2016. — C 116/4/1, COUNCIL 116th session. — 97 p. [Электронный ресурс]. — Режим доступа: www.mit.gov.it/mit/mop_all.php?p_id=6535 (дата обращения: 27.06.2018).
3. ISO 31000: Risk Management — Principles and Guidelines. — 2009. — 36 p. [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <http://ehss.moe.gov.ir/getattachment/56171e8f-2942-4cc6-8957-359f14963d7b/ISO-31000> (дата обращения: 27.06.2018).
4. Goerlandt F. Risk analysis in maritime transportation: principles, frameworks and evaluation: doctoral dissertations / F. Goerlandt. — Aalto University publication series, 2015. — 73 p.
5. Kristiansen S. Maritime Transportation: Safety Management and Risk Analysis / S. Kristiansen. London: Routledge, 2004. — 252 p.
6. A Guide to Risk Assessment in Ship Operations. IACS Recommendation. — No. 127. — 2012. — 8 p.
7. Report on the investigation into near misses. MSC 71/INF.8. — IMO, 1999. — 6 p. [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://docs.imo.org/Shared/Download.aspx?did=2431> (дата обращения: 27.06.2018).
8. Report on the investigation into near misses. MSC 74/I5/1. — IMO, 2001. — 31 p. [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://docs.imo.org/Shared/Download.aspx?did=10369> (дата обращения: 27.06.2018).
9. NYK Fact book I. Segment Business Data. — Ticker code: 9101. — NYK Group, 2016. — 34 p.
10. Dekker S. Just culture: balancing safety and accountability / S. Dekker. — MPG Books Ltd, Bod-min, Cornwall, 2007. — 166 p.

REFERENCES

1. MSC-MEPC.2/Circ.12/Rev.1 Revised guidelines for FSA for use in the IMO rule-making process. International Maritime Organization, 2015.
2. Strategy, planning and reform: Trends, Developments and Challenges facing the IMO in the 2018-2023 period. 6 May 2016. C 116/4/1, COUNCIL 116th session. 97 p. Web. 27 June 2018 <www.mit.gov.it/mit/mop_all.php?p_id=6535>.
3. ISO 31000: Risk Management - Principles and Guidelines. 2009. 36 p. Web. 27 June 2018 <<http://ehss.moe.gov.ir/getattachment/56171e8f-2942-4cc6-8957-359f14963d7b/ISO-31000>>.
4. Goerlandt, F. Risk analysis in maritime transportation: principles, frameworks and evaluation: doc-toral dissertations. Aalto University publication series, 2015.
5. Kristiansen, S. Maritime Transportation: Safety Management and Risk Analysis. London: Routledge, 2004.
6. A Guide to Risk Assessment in Ship Operations. IACS Recommendation. No.127. 2012.
7. Report on the investigation into near misses. MSC 71/INF.8. — IMO, 1999. — 6 p. Web. 27 June 2018 <<https://docs.imo.org/Shared/Download.aspx?did=2431>>.
8. Report on the investigation into near misses. MSC 74/IS/1. — IMO, 2001. — 31 p. Web. 27 June 2018 <<https://docs.imo.org/Shared/Download.aspx?did=10369>>.
9. NYK Fact book I. Segment Business Data. Ticker code: 9101. NYK Group, 2016.
10. Dekker, S. Just culture: balancing safety and accountability. MPG Books Ltd, Bodmin, Cornwall, 2007.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

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

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

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

*Статья поступила в редакцию 16 июля 2018 г.
Received: July 16, 2018.*

DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-4-705-712

RESEARCH THE CHANGE OF SHIP'S SPEED WITH LARGE-CAPACITY IN ICE CONDITIONS ON AREA OF THE NORTHERN SEA ROUTE

E. O. Ol'khovik

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

The increase in cargo turnover along the Northern Sea routes will require the use of large-capacity vessels of high ice class with a high commercial speed. To ensure the safety of Arctic shipping, it is necessary to have objective data on the effect of ice on the speed and maneuverability of vessels. The paper suggests using a geoinformation system whose layers include data on speeds and routes of vessels of various capacities and data of remote sensing of the earth on ice conditions. Two sections of traditional routes in the western part of the Russian Arctic were considered: the sea crossing from the Barents Sea to the Kara Sea through the Kara Gate, the transition from the Barents Sea to the Kara Sea through the Cape of Desire. A joint study of these layers on the example of winter navigation in 2018 provides detailed information on the trends in reducing the speed of ships in fully consolidated ice. Based on the results of the study, the results are presented for four groups of vessels with different gross tonnage, capacity, ice pass and draft. To compare the results, the measured velocities were normalized to relative, which allowed us to identify common dependencies and trends. The availability of archival data on measurements of ice thickness in the geographic area under study and predictive models for increasing ice thickness in winter allows us to develop adequate methods for estimating the change in the properties of ice by varying the speed of vessels of various classes on the routes of traffic in the water area of the Northern Sea Route. Statistical processing of vessel speeds in ice fields has made it possible to identify the monotony of the rate-reduction trends for the main groups of vessels and the distinctive features associated with the vessel's power, the use of icebreaker support.

Keywords: Northern Sea Route, ice conditions, geoinformation system, ice properties, vessel speed.

For citation:

Ol'khovik, Evgeniy O. "Research the change of ship's speed with large-capacity in ice conditions on area of the Northern Sea Route." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 10.4 (2018): 705–712. DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-4-705-712.

УДК 528.47

ИССЛЕДОВАНИЕ ИЗМЕНЕНИЯ СКОРОСТИ КРУПНОТАЖНЫХ СУДОВ В ЛЕДОВЫХ УСЛОВИЯХ АКВАТОРИИ СЕВЕРНОГО МОРСКОГО ПУТИ

Е. О. Ольховик

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

Увеличение грузооборота по трассам Северного морского пути требует использования крупнотоннажных судов высокого ледового класса с большой коммерческой скоростью. Для обеспечения безопасности арктического судоходства необходимо располагать объективными данными о влиянии льда на скорость и маневренные характеристики судов.

Предложено использовать геоинформационную систему, в состав слоев которой включены данные о скоростях и маршрутах движения судов различной вместимости и данные дистанционного зондирования Земли для мониторинга ледовой обстановки. Рассматривались операции на двух участках традиционных маршрутов в Западном секторе российской Арктики: морской переход из Баренцева в Карское море через пролив Карские ворота и переход из Баренцева в Карское море через мыс Желания. Совместное исследование данных слоев на примере зимней навигации 2018 г. позволяет получить подробные сведения о трендах снижения скорости судов в условиях полностью сплоченного льда. По результатам исследования приводятся скоростные режимы для четырех групп судов с различной валовой вместимостью, мощностью, ледопроемкостью и осадкой. Для сравнения измеренные скорости были нормированы в относительную скорость, что позволило выявить общие зависимости и тренды. Наличие архивных данных об измерении

ях толщины льда в исследуемой географической области и прогнозных моделей увеличения толщины льда в зимний период позволяют разработать адекватные методы оценки изменения свойств льда по изменению скорости судов различного класса на маршрутах движения в акватории Северного морского пути. Статистическая обработка скоростей судов в ледовых полях позволила выявить однообразие трендов снижения скорости для основных групп судов и отличительные особенности, связанные с мощностью судна и использованием ледокольного сопровождения.

Ключевые слова: Северный морской путь, ледовая обстановка, геоинформационная система, свойства льда, скорость судов.

Для цитирования:

Ольховик Е. О. Исследование изменения скорости крупнотажных судов в ледовых условиях акватории Северного морского пути / Е. О. Ольховик // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2018. — Т. 10. — № 4. — С. 705–712. DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-4-705-712.

Введение (Introduction)

Существенное увеличение грузооборота в акватории Северного морского пути (СМП) в ближайшие годы потребует организации движения судов в составе морских транспортных потоков с высокой коммерческой скоростью. Основным фактором, оказывающим влияние на снижение скорости судна, является ледовая обстановка. Для оценки влияния льда на скорость и маневренные характеристики судов используются теоретические методы [1], [2], а также модельные [3] и натурные испытания [4]. При этом возможности натурных испытаний в ряде случаев имеют существенные ограничения, связанные с невозможностью активно влиять на ледовые условия при проведении исследований на выбранном полигоне в течение заданного времени [5]. Последнее существенно влияет на репрезентативность полученных экспериментальных данных. Для преодоления этого недостатка предлагается расширить базу экспериментальных данных за счет штатной оперативной навигационной и гидрометеорологической информации. В работе [6] для обеспечения безопасности ледового плавания было предложено совместное использование данных, получаемых от автоматизированной информационной системы движения судов, и прогноза ледовой обстановки.

Рассматриваемый метод имеет особенности, связанные с синхронизацией поступающей информации. Данные о ледовой обстановке, как правило, имеют задержку в три – пять дней, которая приводит к несоответствию результатов измерения скорости судов параметрам льда на маршруте. С учетом того, что выполнение прямых непрерывных измерений свойств льда по пути движения судна выполнить практически невозможно, предложено изменить традиционный подход исследования влияния льда на скоростные режимы судов. При прямолинейном движении однотипных судов во льдах при фиксированной мощности судовой энергетической установки (СЭУ) на изменение скорости судов на маршруте главным образом влияет изменение ледового сопротивления, которое зависит от толщины льда, его упругих свойств и других характеристик льда. Таким образом, исследуя характер изменения скорости на маршруте, можно получить некоторую интегральную оценку характера изменения ледового сопротивления и изменения основных свойств льда, например — толщины льда или его сплоченности. Полученные оценки в дальнейшем могут использоваться для уточнения ледовых карт и корректировки скорости судов других типов.

В работах [7], [8] для анализа скоростных режимов судов в акватории СМП предложено использовать геоинформационную систему (ГИС), позволяющую обеспечить подробную визуализацию морских транспортных потоков и выделить прямолинейные участки маршрутов однотипных судов, движение которых осуществляется при фиксированной мощности СЭУ.

Целью работы является обоснование метода оценки изменения свойств льда по изменению скорости крупнотоннажных судов на маршрутах движения в акватории СМП.

Методы и материалы (Methods and materials)

Для решения поставленной задачи использовалась ГИС СМП, которая содержит сведения о местоположении всех судов, работающих в акватории арктических морей, а также параметрах

их движения. Из всего множества судов, получивших разрешение для работы в акватории СМП, было отобрано 25 судов, работающих в Западном секторе Арктики (Карское море) круглогодично. Все суда разбиты на четыре группы:

1-я группа — газозовы проекта Yamalmax (Arc7), предназначенные для транспортировки сжиженного природного газа;

2-я группа — танкеры проекта 42К (Arc7), предназначенные для перевозки сырой нефти;

3-я группа — контейнеровозы проекта «Норильский никель» (Arc7), предназначенные для перевозки руды;

4-я группа — суда класса Arc5, предназначенные для перевозки генеральных грузов и работающие с ледакольной проводкой.

Основные характеристики судов, входящих в каждую группу:

1-я группа — ледовый класс Arc7, вместимость 128,8 тыс. т, лёдопроходимость 2,1 м, мощность 45 МВт, осадка 12 м;

2-я группа — ледовый класс Arc7, вместимость 44,3 тыс. т, лёдопроходимость 1,8 м, мощность 32 МВт, осадка 9,5 м;

3-я группа — ледовый класс Arc7, вместимость 17 тыс. т, лёдопроходимость 1,5 м, мощность 18 МВт, осадка 10 м;

4-я группа — ледовый класс Arc5, вместимость 7 – 13,8 тыс. т, мощность 8,5 МВт, осадка 7 м.

Наблюдения были отнесены к началу зимней навигации (первая декада февраля 2018 г.) и к окончанию зимней навигации (первая декада июня 2018 г.). Ледовые условия в период наблюдения характеризовались как легкие и средние, что позволяло судам с категорией ледового усиления Arc 7 совершать в Западном секторе российской Арктики самостоятельное плавание, а судам с категорией ледового усиления Arc 5 совершать плавание только под проводкой ледаколов.

Рассматривались два участка: морской переход из Баренцева в Карское море через пролив Карские ворота и переход из Баренцева в Карское море через мыс Желания. Выбор участков был обусловлен тем, что в рассматриваемый временной период Баренцево море было полностью освобождено ото льда, что позволяло определить скорость судна на чистой воде, тогда как акватория Карского моря была практически полностью покрыта сплоченным льдом. В обработку включались данные о движении однотипных групп судов в ледовых полях. В качестве вспомогательной информации использовались оперативные данные о ледовой обстановке, размещенные в открытом доступе на сайтах Администрации СМП [9], Арктического и Антарктического научно-исследовательского института (ААНИИ) [10], Национального центра данных по снегу и льду (National Snow and Ice Data Center — NSIDC) [11], а также данные, содержащиеся в монографии [12]. Следует отметить, что оперативные данные NSIDC поступают в открытый доступ с задержкой не менее трех суток. Прогнозы ААНИИ по ледовой обстановке даются с заблаговременностью на период от трех до 30 сут. По архивным данным [9] – [12], в начале зимней навигации акватория Карского моря практически полностью была покрыта однолетним льдом толщиной 0,4 – 0,7 м при сплоченности в 7 баллов. В конце зимнего навигационного периода акватория была покрыта сплоченным льдом 7 – 10 баллов и толщиной до 1,5 м с торосами, многолетний лед отсутствовал. При обработке данных учитывались результаты теоретических исследований, посвященных взаимодействию корпуса судна со льдом, обзор которых приведен в работе [13].

Все разрабатываемые модели условно подразделялись на группы в зависимости от их назначения. К первой группе отнесены модели, которые используются при проектировании новых типов судов, способных на определенной скорости преодолевать льды заданной толщины. Такие модели, как правило, включают в себя значительное количество параметров, что затрудняет их использование и интерпретацию результатов вычислений [14] – [17]. Ко второй группе отнесены модели, которые используются для составления ледовых паспортов судов. Модели используются также при расчете скорости судов, безопасной для плавания в заданных ледовых условиях [18], [19]. К третьей группе отнесены упрощенные математические модели, которые используются при оперативном планировании перехода во льдах. Модели удобны для выполнения расчетов,

однако точность полученных с их использованием результатов нуждается в дополнительном обосновании [20], [21].

При построении всех моделей использовался ряд допущений и упрощений, касающихся структуры и физических свойств льда и ледовых полей. Принятые допущения, безусловно, оказывают влияние на точность вычислений, но несмотря на это, не оказывают существенного влияния на правильность описываемых моделями взаимодействий.

Результаты (Results)

Результаты измерения скорости крупнотоннажных судов на маршрутах в акватории СМП представлены на рис. 1 и 2. По вертикальной оси на графиках, приведенных на этих рисунках, отложена нормированная скорость движения судна. В качестве нормировки использовалась максимальная скорость на открытой воде для каждого типа судна. На рис. 1 приведены данные о скоростях судов всех групп за период с 09.02.2018 г. по 10.06.2018 г. Сплошной линией на графике показана линия тренда изменения скорости, показывающая ее снижение. Тренд объясняется увеличением толщины льда за период наблюдения. За отмеченный период скорость ежемесячно снижалась на 6,5 %.

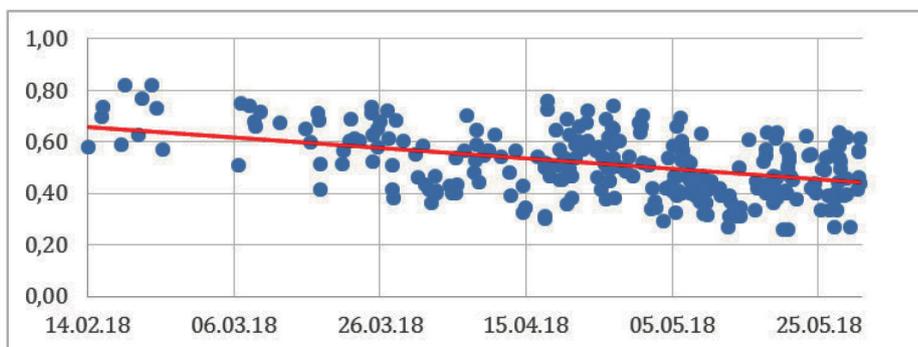
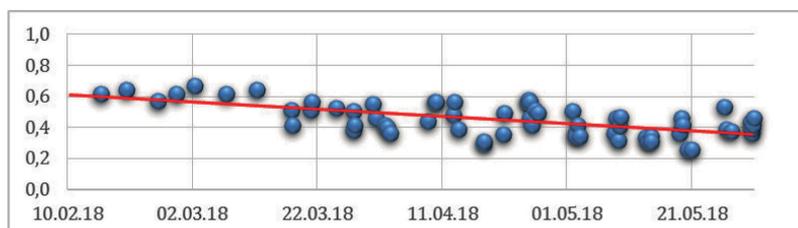


Рис. 1. Скорости судов всех групп

На рис. 2 приведены данные об изменении скорости различных групп судов. На рис. 2, а приведены данные об изменении скорости судов типа YamalMax. Сплошной линией показана линия тренда изменения скорости, которая соответствует уменьшению скорости по линейной зависимости. Для судов YamalMax максимальная скорость на чистой воде составляет 20 уз, ледопроемкость — 2,1 м. За отмеченный период скорость ежемесячно снижалась на 7,2 %.

а)



б)

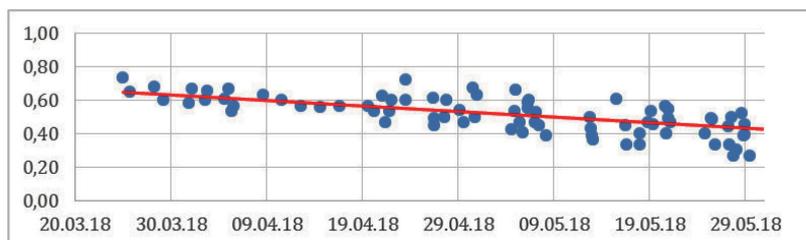
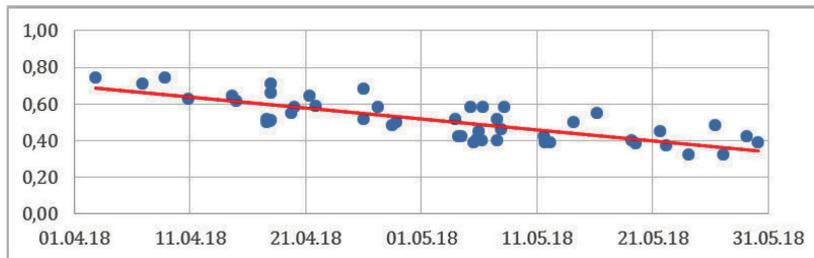


Рис. 2. Изменение скорости различных групп судов

в)



г)

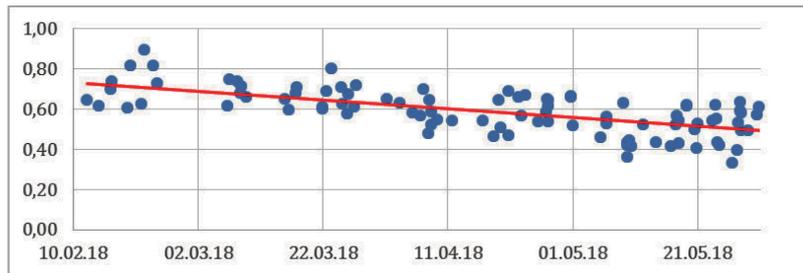


Рис. 2. Изменение скорости различных групп судов:
 а — типа YamalMax; б — типа 42К; в — типа «Норильский никель»;
 г — Arc5 при плавании под ледокольной проводкой

На рис. 2, б приведены данные о скоростях группы судов типа 42К. За период наблюдения относительная скорость уменьшалась на 6,5 % ежемесячно. Для судов 42К максимальная скорость на чистой воде составляет 14,5 уз, ледопроемимость — 1,8 м. На рис. 2, в приведены данные о скоростях группы судов типа «Норильский никель». За период наблюдения относительная скорость уменьшалась на 9,5 % ежемесячно. Для судов типа «Норильский никель» максимальная скорость на чистой воде составляет 15 уз, ледопроемимость — 1,5 м. На рис. 2, г приведены данные о скоростях группы судов ледового класса Arc5 при плавании под проводкой атомных ледоколов. За период наблюдения относительная скорость уменьшалась на 6,3 % ежемесячно.

Обсуждение (Discussion)

Приведенные результаты показывают, что в период зимней навигации отмечается устойчивое снижение относительной скорости движения крупнотоннажных судов во льдах от 6,3 до 9,5 %. По данным ледовых наблюдений, за отмеченный период на рассматриваемых маршрутах СМП толщина льда изменялась от 0,5 до 1,5 м. Графики изменения скорости рассмотренных типов судов сохраняют общую тенденцию, но каждый имеет свои особенности изменения скоростного режима в ледовых полях. Суда с высокой мощностью и суда под проводкой ледокола воспринимают максимальное сопротивление только в конце зимней навигации, когда толщина льда превышает 1 м. Полученные результаты согласуются с данными, полученными в работе [22]. Следует отметить, что при скоростях движения до 4 – 6 уз, когда суда теряют свои маневренные характеристики, проведение наблюдений, связанных с изучением влияния льда на скорость судна, имеет существенные ограничения.

Заключение (Conclusion)

Полученные результаты согласуются с теоретическими моделями [1], [2] и физическими процессами [4], [5]. Подтверждено преобладающее влияние изменения ледовых условий на снижение скорости крупнотоннажных судов. Анализ показал, что в период наблюдений на мелководье скорость течения и ветра на уменьшение скорости судов не оказывают существенного влияния.

Полученные результаты являются предварительными, так как базируются на ограниченном объеме статистических данных за 2018 г. В дальнейшем предполагается расширить период для исследований и уточнить структуру и вид функциональной зависимости, позволяющей по измерению изменения скорости судов производить оценку изменения ледовых условий по маршруту движения судна.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Сазонов К. Е. Теоретические основы плавания судов во льдах / К. Е. Сазонов. — СПб.: Изд-во ЦНИИ им. акад. А. Н. Крылова, 2010. — 274 с.
2. Костылев А. И. Разработка методов расчета параметров судов при нестационарном движении в ледовых условиях: автореф. дисс. ... канд. техн. наук / А. И. Костылев. — СПб.: ФГУП «Крыловский государственный научный центр», 2017. — 22 с.
3. Бокатова Е. А. Расчет скорости движения судна по ледяному каналу в условиях сжатия при частичном взаимодействии бортов с его кромками / Е. А. Бокатова, К. Е. Сазонов // Труды ЦНИИ им. акад. А. Н. Крылова. — 2012. — № 66 (350). — С. 43–46.
4. Апполонов Е. М. Исследование ледовой ходкости ледокола «Санкт-Петербург» в Карском море / Е. М. Апполонов, В. А. Беляшов, К. Е. Сазонов [и др.] // Судостроение. — 2011. — № 4. — С. 9–12.
5. Лопашев К. А. Ледовые натурные испытания ледокола «Новороссийск» в Карском море / К. А. Лопашев, К. Е. Сазонов, О. Я. Тимофеев // Труды Крыловского государственного научного центра. — 2017. — № 3 (381). — С. 35–42. DOI: 10.24937/2542-2324-2017-3-381-35-42.
6. Goerlandt F. An analysis of ship escort and convoy operations in ice conditions / F. Goerlandt, J. Montewka, W. Zhang, P. Kujala // Safety science. — 2017. — Vol. 95. — Pp. 198–209. DOI: 10.1016/j.ssci.2016.01.004.
7. Ольховик Е. О. Информационная модель морских транспортных потоков Северного морского пути / Е. О. Ольховик, А. Б. Афонин, А. Л. Тезиков // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2018. — Т. 10. — № 1. — С. 97–105. DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-1-97-105.
8. Ольховик Е. О. Анализ скоростных режимов СПГ-танкеров в акватории Северного морского пути в период зимней навигации 2017 – 2018 гг. / Е. О. Ольховик // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2018. — Т. 10. — № 2. — С. 300–308. DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-2-300-308.
9. Администрация Северного морского пути. Карты ледовой обстановки. [Электронный ресурс]. — Режим доступа: http://www.nsr.ru/ru/navigatsionnaya_i_gidrometinformatiya/chart_ice_kara_sea.html (дата обращения: 01.07.2018).
10. Генерализованные карты состояния ледяного покрова в арктических и замерзающих морях России и Гренландского моря. [Электронный ресурс]. — Режим доступа: http://www.aari.ru/odata/_d0004.php?mod=0&m=Kar (дата обращения: 01.07.2018).
11. National Snow and Ice Data Center (NSIDC). Arctic Sea Ice News & Analysis. [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://nsidc.org/arcticseaicenews/> (дата обращения: 01.07.2018).
12. Думанская И. О. Ледовые условия морей европейской части России / И. О. Думанская. — М.: Обнинск: ИГ-СОЦИН, 2014. — 605 с.
13. Jones S. J. Ships in ice—a review / S. J. Jones // 25th Symposium on Naval Hydrodynamics. — St. John's, Newfoundland and Labrador, Canada, 2004.
14. Jansson J-E. Ice-breakers and their design, Pt.I / J-E. Jansson // European Shipbuilding. — 1956. — No. 5. — Pp. 112–128.
15. Jansson J-E. Ice-breakers and their design, Pt.II / J-E. Jansson // European Shipbuilding. — 1956. — No. 6. — Pp. 143–151.
16. Каштелян В. И. Сопrotивление льда движению судна / В. И. Каштелян, И. И. Позняк, А. Я. Рывлин. — Л.: Судостроение, 1968. — 238 с.
17. Lewis J.W. Methods for predicting icebreaking and ice resistance characteristics of icebreakers / J.W. Lewis, R.Y. Edwards // Trans. SNAME. — 1970. — Vol. 78. — Pp. 213–249.
18. Кулеш В. А. Ледовая сертификация судов на условия арктических категорий / В. А. Кулеш, С. В. Каленчук // Морские интеллектуальные технологии. — 2016. — Т. 1. — № 3 (33). — С. 52–56.

19. Голиков В. В. Определение ледопроеходимости судов для плавания в неарктических морях / В. В. Голиков, П. А. Костенко, О. Н. Мазур // Судовые энергетические установки. — 2014. — № 33. — С. 183–190.
20. Снопков В. И. Управление судном / В. И. Снопков. — СПб.: Професионал, 2004. — 536 с.
21. Цой Л. Г. Формула для определения ледопроеходимости и рекомендации по выбору формы обводов корпуса ледоколов и транспортных судов ледового плавания / Л. Г. Цой // Перспективные типы морских транспортных судов, их мореходных и ледовых качеств: сб. науч. тр. ЦНИИМФ. — М: Транспорт, 1990. — С. 141–144.
22. Löptien U. Ice and AIS: ship speed data and sea ice forecasts in the Baltic Sea / U. Löptien, L. Axell // The Cryosphere. — 2014. — Vol. 8. — No. 6. — Pp. 2409–2418. DOI: 10.5194/tc-8-2409-2014.

REFERENCES

- Sazonov, K.E. *Teoreticheskie osnovy plavaniya sudov vo l'dakh*. SPb.: TsNII im. akad. A.N. Krylova, 2010.
- Kostylev, A.I. *Razrabotka metodov rascheta parametrov sudov pri nestatsionarnom dvizhenii v ledovykh usloviyakh*. Abstract of PhD diss. SPb.: FGUP «Krylovskii gosudarstvennyi nauchnyi tsentr», 2017.
- Bokatova, E.A., and K.E. Sazonov. “Raschet skorosti dvizheniya sudna po ledyanomu kanalu v usloviyakh szhatiya pri chastichnom vzaimodeistvii bortov s ego kromkami.” *Trudy TsNII im. akad. A.N. Krylova* 66(350) (2012): 43–46.
- Appolonov, E.M., V.A. Belyashov, K.E. Sazonov, D.S. Skryabin, and E.V. Igoshin. “Investigation of ice performance of “SaintPetersburg” icebreaker in Kara sea.” *Shipbuilding* 4 (2011): 9–12.
- Lopashev, Kirill A., Kiril Ye. Sazonov, and Oleg Ya. Timofeev. “Full-scale ice trials of Novorossiysk icebreaker in the Kara sea.” *Transactions of the Krylov State Research Centre* 3(381) (2017): 35–42 DOI: 10.24937/2542-2324-2017-3-381-35-42.
- Goerlandt, Floris, J. Montewka, W. Zhang, and P. Kujala. “An analysis of ship escort and convoy operations in ice conditions.” *Safety science* 95 (2017): 198–209. DOI: 10.1016/j.ssci.2016.01.004.
- Olhovik, Evgeniy O., Andrej B. Afonin, and Aleksandr L. Tezikov. “Information model of maritime transport flows of the North sea route.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 10.1 (2018): 97–105. DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-1-97-105.
- Ol'khovik, Evgeniy O. “Analysis of speed regime LNG-tankers in the Northern sea route in period of winter navigation 2017-18.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 10.2 (2018): 300–308. DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-2-300-308.
- Administratsiya Severnogo morskogo puti. Karty ledovoi obstanovki. Web. 1 July 2018 <http://www.nsr.ru/ru/navigatsionnaya_i_gidrometinformatsiya/chart_ice_kara_sea.html>.
- Generalizovannye karty sostoyaniya ledyanogo pokrova v arkticheskikh i zamerzayushchikh moryakh Rossii i Grenlandskogo moray. Web. 1 July 2018 <http://www.aari.ru/odata/_d0004.php?mod=0&m=Kar>.
- National Snow and Ice Data Center (NSIDC). Arctic Sea Ice News & Analysis. Web. 1 July 2018 <<https://nsidc.org/arcticseaicenews/>>.
- Dumanskaya, I.O. *Ledovye usloviya morei evropeiskoi chasti Rossii*. M.; Obninsk: IG-SOTsIN, 2014.
- Jones, Stephen J. “Ships In Ice - A Review.” *25th Symposium on Naval Hydrodynamics*. St. John's, Newfoundland and Labrador, Canada, 2004.
- Jansson, J-E. “Ice-breakers and their design, Pt.I.” *European Shipbuilding* 5 (1956): 112–128.
- Jansson, J-E. “Ice-breakers and their design, Pt.II.” *European Shipbuilding* 6 (1956): 143–151.
- Kashtelyan, V.I., I.I. Poznyak, and A.Ya. Ryvlin. *Soprotivlenie l'da dvizheniyu sudna*. L.: Sudostroenie, 1968.
- Lewis, Jack W., and Roderick Y. Edwards Jr. “Methods for predicting icebreaking and ice resistance characteristics of icebreakers.” *Trans. SNAME* 78 (1970): 213–249.
- Kulesh, V.A., and S.V. Kalenchuk. “Ledovaya sertifikatsiya sudov na usloviya arkticheskikh kategorii.” *Morskie intellektual'nye tekhnologii* 1.3(33) (2016): 52–56.
- Golikov, V.V., P.A. Kostenko, and O.N. Mazur. “Opredelenie ledoprokhodimosti sudov dlya plavaniya v nearkticheskikh moryakh.” *Sudovye energeticheskie ustanovki* 33 (2014): 183–190.
- Sнопков, V.I. *Upravlenie sudnom*. SPb.: Professional, 2004.

21. Tsoi, L.G. “Formula dlya opredeleniya ledoprokhodimosti i rekomendatsii po vyboru formy obvodov korpusa ledokolov i transportnykh sudov ledovogo plavaniya.” *Perspektivnye tipy morskikh transportnykh sudov, ikh morekhodnykh i ledovykh kachestv: sb. nauch. tr. TsNIIMF*. M: Transport, 1990. 141–144.

22. Löptien, Ulrike, and Lars Axell. “Ice and AIS: ship speed data and sea ice forecasts in the Baltic Sea.” *The Cryosphere* 8.6 (2014): 2409–2418. DOI: 10.5194/tc-8-2409-2014.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

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

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

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

Статья поступила в редакцию 16 июля 2018 г.

Received: July 16, 2018.

DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-4-713-723

SIMULATION FOR THE EVALUATION OF THE SEA PORT STORAGE'S PARAMETERS

S. S. Valkova

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

The permanent growth of the competition among the sea trade ports in the global logistic space is an attribute of the current state of the world trade development. This paper deals with a new role of sea trade ports in vertical links and horizontal echelons of global supply chains put a pressure on commercial aspects of their operations, which reflects in required technical characteristics. It states that technologic changes, narrowed specialization and quick growth of ship sizes firstly induce the increase in demands for bigger throughput capacity of the port complexes. Environmental restriction in majority of cases exclude a simple extensive territory development, since historically ports usually develop in the centers of urbanistic regions. The article shows that the increased capitalization of port development due to introduction of new technologies and complicated facilities causes the growth of commercial risks in dedicated projects. In the same time, the deficit of port facilities deteriorates the port service quality and threatens the port's market stability. All these factors lead to radical changes of demands, norms and quality of the technologic development and project of sea port complexes. The losses connected with the inadequate utilization of port facilities should be balanced with the losses connected with their deficit, so the technologic design is expected to produce data and information required to take this decision. The methods used today were developed in the abandoned paradigm of administrative economy, and their usage causes a potential danger for successful commercial operation activity of the port complexes. Consequently, the development of new, more adequate and precise methods for evaluation of main structural parameters of port complexes form a very actual tasks. The paper describes one method of this kind, the evaluation of the sea port storage's parameters by simulation.

Keywords: sea port, stock, storage, simulation.

For citation:

Valkova, Svetlana S. "Simulation for the evaluation of the sea port storage's parameters." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admiral S. O. Makarova* 10.4 (2018): 713–723. DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-4-713-723.

УДК 656:6

ОЦЕНКА ПАРАМЕТРОВ СКЛАДА МОРСКОГО ПОРТА МЕТОДАМИ ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

С. С. Валькова

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

Одним из атрибутов современного этапа развития мировой системы транспортировки грузов служит постоянно растущая конкуренция морских портов в глобальном транспортном пространстве. В статье изучено изменение роли морских портов во всех вертикальных звеньях и горизонтальных эшелонах логистических цепей, которое оказывает давление на качественные параметры их деятельности. Отмечено, как изменившиеся технологические факторы, усложнившаяся специализация и быстрый рост размеров судов приводят к резкому росту требований к пропускной способности портовых комплексов, в то время как экологические ограничения в большинстве случаев исключают простое экстенсивное развитие морских портов, как правило, исторически оказывающихся в пределах селитебных территорий. Показано, что повысившаяся вследствие внедрения новых технологий грузообработки специализация элементов портовой инфраструктуры в этих условиях приводит к значительным рискам при реализации портовых проектов. Выявлено, что дефицит портовых мощностей снижает качество обслуживания грузоперевозчиков и создает угрозы конкурентной позиции морского порта, которое вызывает коренное

изменение условий, норм и качества технологического проектирования портовых комплексов. При проработке вопросов учитывалось, что потери вследствие недостаточной эффективности использования операционных ресурсов должны быть сбалансированы с потерями от их дефицита, и технологическое проектирование должно предоставлять для этого соответствующую информацию и данные. Используемые сегодня методы проектирования морских портов, разработанные в парадигме утратившей актуальность командно-административной экономической системы, становятся источником потенциальной опасности для успешности коммерческой деятельности морского порта. В статье делается вывод о том, что проблема создания новых, более адекватных и точных методов расчета параметров основных структурных элементов порт становится все более актуальной. Поскольку, в первую очередь, к таким капиталоемким структурным элементам относятся складские мощности, в статье предлагается более точный и эффективный метод оценки соответствующих технологических параметров. Показано, что научной основой соответствующего исследования является разработка способов работы со входными, промежуточными и выходными расчетными параметрами не как с детерминированными, а как со случайными величинами.

Ключевые слова: морские порты, склады, теория запасов, моделирование.

Для цитирования:

Валькова С. С. Оценка параметров склада морского порта методами имитационного моделирования / С. С. Валькова // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2018. — Т. 10. — № 4. — С. 713–723. DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-4-713-723.

Введение (Introduction)

Изменение роли морских портов в современной международной торговле и обеспечивающей ее глобальной логистической системе отмечается многими источниками. В работе [1], например, формулируется новый функциональный домен современного морского порта, в [2] идентифицированы новые роли и качественные показатели их работы. Задача качественного повышения эффективности использования складских мощностей морского порта как центрального и во многом системообразующего элемента в них признается одной из наиболее актуальных при технологическом проектировании этих важнейших для объектов транспортной инфраструктуры [3] – [4]. Вопросы оценки технологических параметров операционных складов морских портов и терминалов посвящены работы многих зарубежных и отечественных исследователей [5] – [10].

Обширный справочный материал и практические рекомендации содержатся в изданиях, периодически публикуемых World Bank, UNCTAD, НРС и др. [11] – [13]. Однако, несмотря на фундаментальную проработку многих научных проблем, ряд важных задач, касающихся рационализации проектирования складских портовых мощностей, остаются нерешенными. Для решения этой задачи необходимо на основании современных транспортно-логистических представлений идентифицировать и ранжировать основные функции склада морского порта, оценить адекватность существующих методов технологического проектирования морских портов, сформулировать требования и определить характеристики новых инструментов проектирования в части определения требуемой вместимости складов морского порта. Это, в свою очередь, позволит создать последовательность имитационных моделей обобщенного склада морского порта в качестве центрального элемента исследований, фокусирующихся на динамике поведения объема хранения.

Разработанная совокупность аналитических, статистических и имитационных моделей должна предоставить возможность оценки последствий периодически возникающего дефицита складских мощностей при заданных статистических неоднородностях грузопотоков морского и сухопутного транспорта. Для доказательства адекватности, результативности и эффективности предлагаемого методического инструментария технологического проектирования следует обосновать соответствующую процедуру, отсутствие которой не позволит перевести все результаты из области теоретических построений в сферу практического использования. После завершения соответствующей процедуры необходимо выполнить экспериментальную оценку эффективности созданного инструментария проектирования, что позволит предложить методику ее использования в технологическом проектировании, планировании и управлении работой морского порта [14] – [15].

Цель описываемого в данной работе исследования состоит в повышении эффективности использования основного структурного элемента морского порта, складских мощностей путем определения технологически обоснованных параметров, обеспечивающих баланс их нехватки и недоиспользования. Средством оценки технологических параметров являются методы аналитического, вероятностно-статистического и имитационного моделирования, что позволит повысить эффективность операций всего морского порта. Способом достижения этой цели является создание теоретически обоснованного метода многокритериальной оптимизации и рационализации размеров склада морского порта как его основного технологического ресурса, учитывающего качество оказываемых портом услуг, а также выявление механизмов влияния стохастических факторов на работу склада и порта в целом.

Методы и материалы (Methods and Materials)

В работе [15] автором были сформулированы следующие основные функции склада морского порта:

- передача грузопотоков между различными видами транспорта;
- преобразование формы грузопотока;
- согласование размеров партий сопрягаемых видов транспорта;
- демпфирование неравномерности работы транспорта;
- коммерческое хранение грузов;
- логистическая доработка грузов.

Там же была дана универсальная функциональная структура транспортно-технологической системы порта или терминала общего вида, отражающая специфику выполнения указанных функций и определяющая роль в них склада (рис. 1).

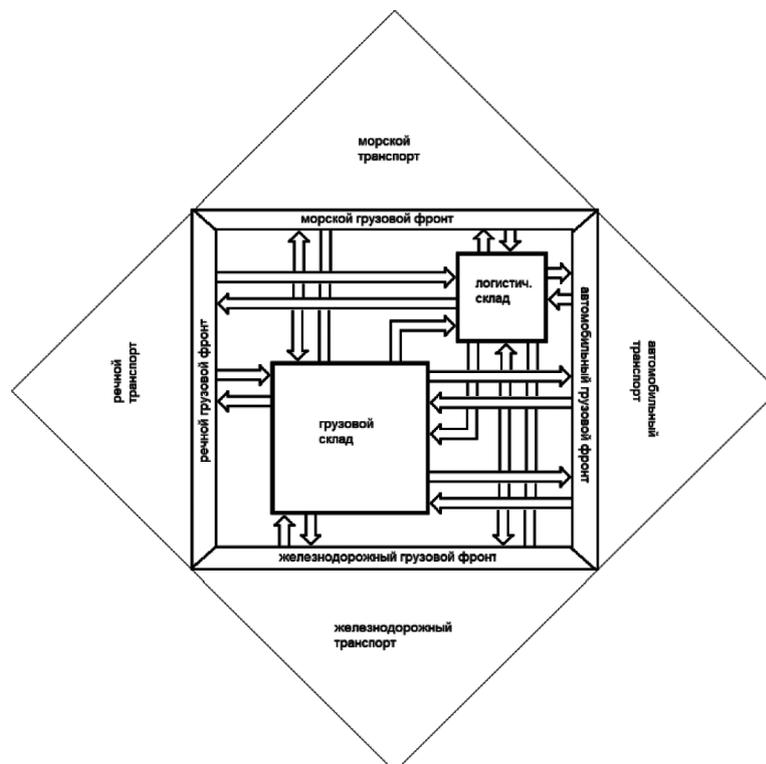


Рис. 1. Универсальная функциональная структура морского порта

Динамика изменения объема хранения груза определяется всего двумя процессами, а именно: поступлением его на склад и вывозом со склада. Точнее, мгновенный объем хранения груза в момент t есть разница между объемом завезенного и вывезенного груза:

$$E(t) = I(t) - o(t), \quad (1)$$

где $E(t)$ — объем хранения в момент времени t ; $I(t)$ — суммарный объем завезенного груза; $o(t)$ — суммарный объем вывезенного груза.

Обозначив как $\Delta e(t)$, $\Delta i(t)$, $\Delta o(t)$ приращения объема хранимого, завезенного и вывезенного груза, можно преобразовать соотношение (1) в его конечно-разностный аналог:

$$\Delta e(t) = \Delta i(t) - \Delta o(t). \quad (2)$$

Отсюда следует, что скорость изменения объема складирования $e(t)$ есть разница между скоростью поступления груза на склад $i(t)$ и скоростью вывоза груза с него $o(t)$:

$$e(t) = i(t) - o(t). \quad (3)$$

Дифференцирование уравнения (1) дает уравнение (3), но последнему сопоставляется семейство первообразных функций:

$$E(t) = \int_0^t e(t) dt = \int_0^t i(t) dt - \int_0^t o(t) dt = I(t) - o(t) + C. \quad (4)$$

В этом уравнении C — произвольная константа, и различные склады, описываемые одним уравнением (3), показывают одинаковую динамику относительных изменений при различии абсолютных значений этой величины C .

В работе [16] автором показано, что любые измерения и результаты моделирования обычно представлены величинами $i(t)$ и $o(t)$, в то время как практические потребности определяются значением $E(t)$. Указанная постоянная характеризует компоненту объема складирования, отвечающую за внешнее (коммерческое) складирование. За характер и размеры колебания объема хранимого груза ответственны пространственно-временные различия: $\Delta i(t)$ и $\Delta o(t)$. Пространственная компонента связана с различными типовыми размерами транспортных партий по видам, временная компонента связана с неравномерностью поступления транспортных средств.

Обозначив $T_{\text{инт}}$ как средний интервал между поступлениями грузовых партий на склад, среднее значение объема хранения в расчетно-аналитических методах можно выразить в виде

$$E = \frac{NVT_{\text{xp}}}{365} = \frac{VT_{\text{xp}}}{T_{\text{инт}}}. \quad (5)$$

Для обычно предполагаемого с целью упрощения расчетов равномерного треугольного закона формирования грузовых партий, при котором время хранения составляет половину времени формирования партии $T_{\text{xp}} = 2T_{\text{фор}}$, формула (4) позволяет оценить не только средний, но и максимальный объем хранения груза, т. е. размер склада:

$$E_{\text{max}} = \frac{VT_{\text{xp}}}{T_{\text{инт}}} + \frac{V}{2} = \frac{VT_{\text{фор}}}{2T_{\text{инт}}} + \frac{V}{2} = \frac{V}{2} \cdot \left(\frac{T_{\text{фор}}}{T_{\text{инт}}} + 1 \right). \quad (6)$$

Именно такой вид формулы предлагается в Нормативах технологического проектирования морских портов, которые в настоящее время жестко регламентируют применяемые методы и используемые процедуры технологического проектирования. Однако на вид результирующей кривой более существенное влияние оказывают иные факторы, такие как колебания размеров партий и неравномерности их поступления (рис. 2).

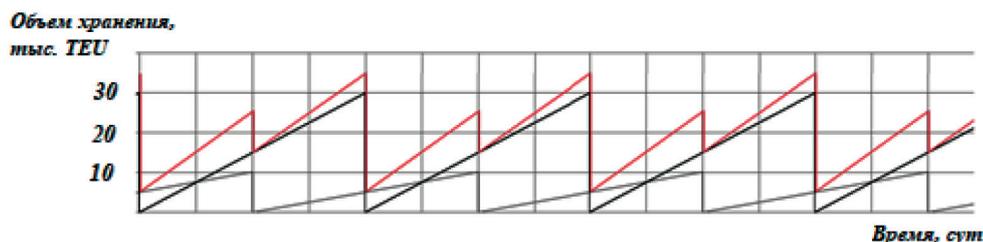


Рис. 2. Динамика изменения объема хранения при колебаниях размера партий

Для получения более информативных оценок объема хранения в исследовании был использован метод статистических испытаний, схема которого предполагала последовательной генерации значений наборов случайных величин, входящих в исследуемую зависимость, и использование сгенерированных значений для вычисления значения функции по одной из формул (4) – (5).

Многократное повторение испытаний дает статистический массив значений случайной величины, обработка которого формирует приближение интегральной функции распределения. Например, на рис. 3 представлены интегральные функции распределения случайных величин (непрерывных и дискретных).



Рис. 3. Функции распределения исходных расчетных величин:
 а — объем партии; б — срок хранения; в — интервал судозахода

На рис. 4 показана гистограмма плотности распределения вероятности значений объема хранения на складе для данного примера.



Рис. 4. Гистограмма плотности распределения объема хранения груза на складе

В реальных случаях характер поступления партий на склад является смешанным, когда одна часть грузопотока обслуживается судами, работающими по линейному расписанию, либо определенному или точному, а другая часть — судами, интервал между заходами которых является случайной величиной. Согласно положениям теории массового обслуживания, в том случае, когда потоки событий формируются из нескольких компонентов разной статистической природы, адекватность утрачивают и аналитические, и вероятностно-статистические методы. Для иллюстрации этого предположим, что порт принимает несколько групп судов (линий) с разными, но равномерными интервалами между судозаходами и идентичными судовыми партиями (рис. 5).

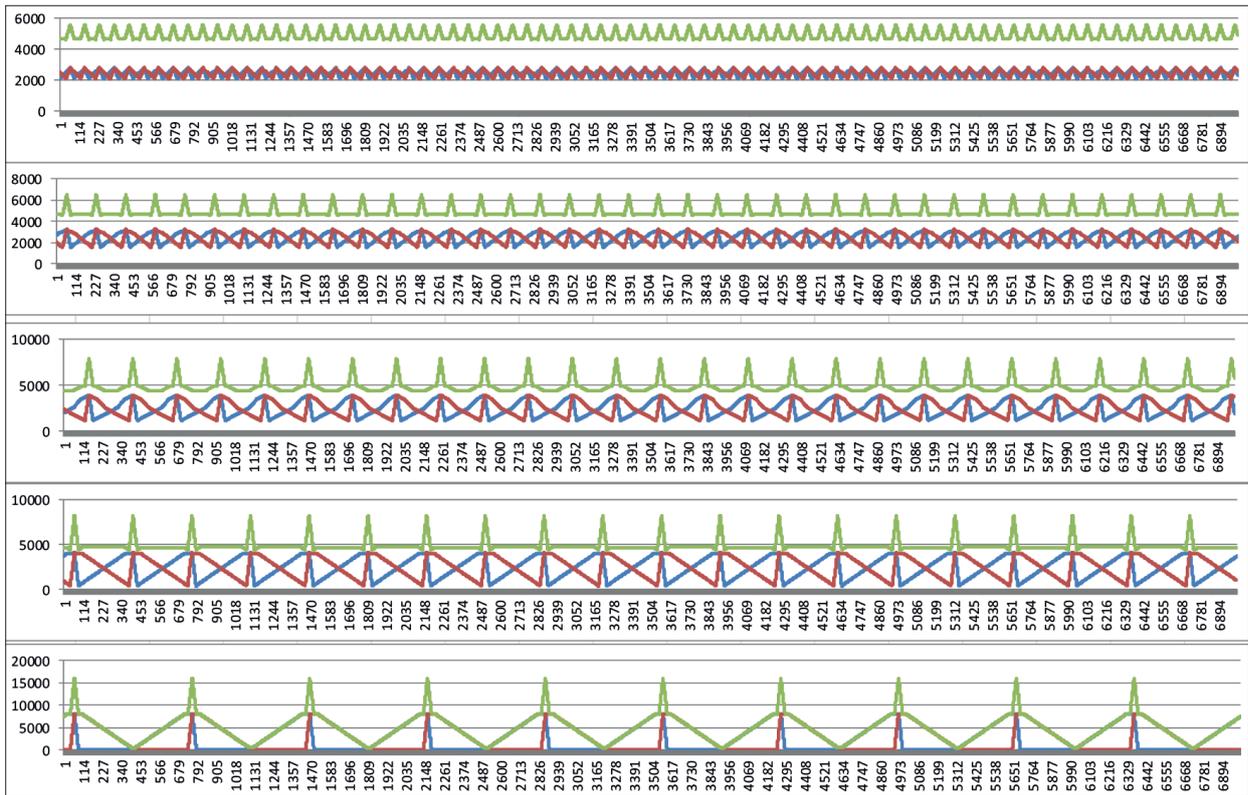


Рис. 5. Графики формирования партий по группам судов (линиям)

Результирующий график, как и его импортная и экспортная составляющая, полученные моделированием соответствующих процессов, характеризуются значительной неравномерностью (рис. 6).

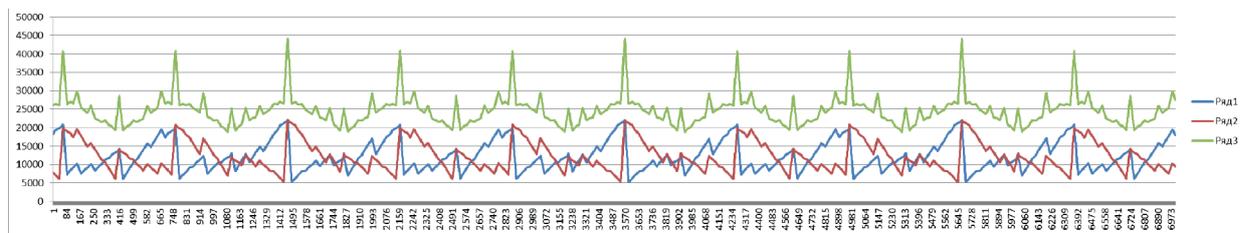


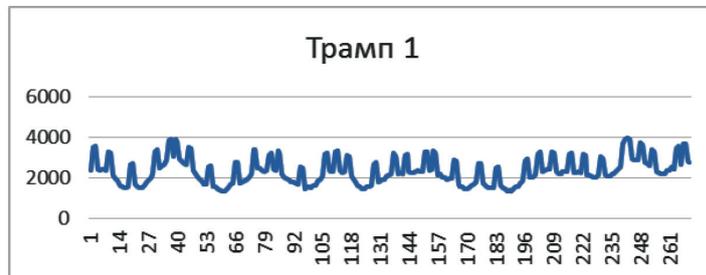
Рис. 6. Результирующие графики формирования грузовых партий

В описываемом исследовании решение проблемы сложной структуры грузопотока различной статистической природы предлагается в форме построения имитационной модели поступления в порт судов, разделенных на произвольное число компонент с разными стохастическими характеристиками.

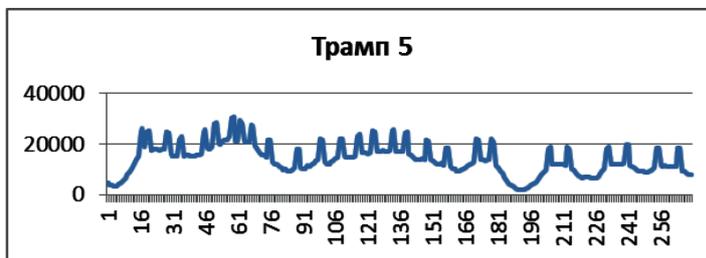
Имитационная модель динамики склада в качестве начального этапа предполагает активацию процесса генерации случайных величин — судозаходов различных типов судов, подчиняющихся различным законам распределения интервалов, имеющих разбросы объемов судовых партий и времени обслуживания, отличающихся различными законами распределения срока хранения относительно средних величин. Для возможности проведения многовариантного анализа моделирование в данном случае выполняется в два этапа: сначала производится генерация случайной выборки событий — прибытия судов в порт, являющаяся реализацией ансамбля случайных и детерминированных величин (интервалов судозахода), затем случайные судозаходы генерируются по законам, задаваемым порядком распределения Эрланга или любым иным. Су-

дозаходы, подчиняющиеся точному расписанию, задаются аналитическими формулами, а судозаходы, определяемые временными окнами, генерируются по нормальному распределению внутри их протяженности. Примеры исходных и выходных величин процесса моделирования даны на рис. 7.

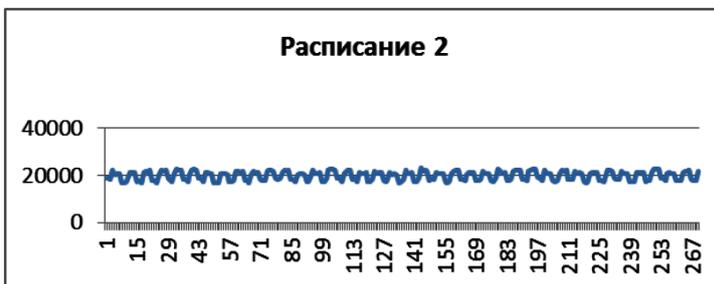
а)



б)



в)



г)



Рис. 7. Результаты имитационного статистического моделирования судозаходов:
 а — трамповое расписание (компонента 1); б — трамповое расписание (компонента 5); в — линейное расписание (компонента 2); г — динамика изменения суммарного объема хранения

Трамповые компоненты, примеры которых обозначены «трампы 1» и «трамп 7» на рис. 7, а, совместно с линейным регулярным расписанием (рис. 7, в) дают весьма вариативный совокупный поток, показанный на рис. 7, г.

Результаты статистической обработки данного временного ряда по своей природе аналогичны обработке статистического ряда, получаемого в результате использования методов статистических испытаний: они характеризуют плотность распределения случайной величины — объема

хранения груза на складе морского порта (рис. 8), но и эта имитационная вероятностно-статистическая модель динамики склада служит лишь для уточнения представлений о границах его изменчивости, поскольку не учитывает ограничения, вносимые нехваткой ресурсов.



Рис. 8. Плотность распределения объема хранения, полученная методом имитационного моделирования

Так, на рис. 9 показан пример возникновения очереди судов в ожидании обслуживания, вызванных переполнением склада морского порта (отсутствием достаточной пропускной способности смежного транспорта).

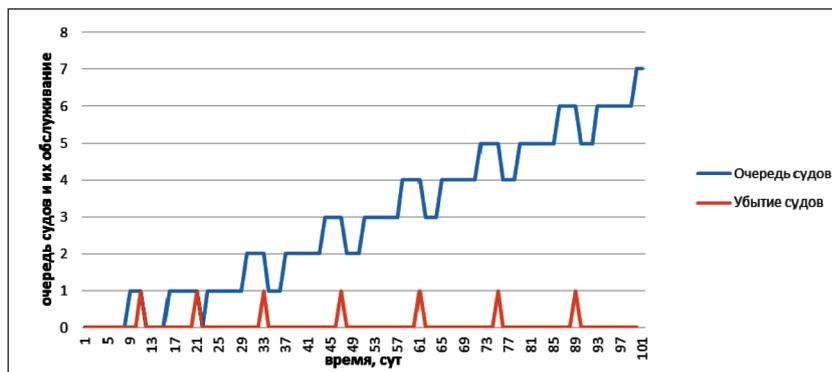


Рис. 9. Пример моделирования обслуживания судов в условиях переполнения склада

Для наиболее полной и точной оценки влияния характеристик склада на качество обслуживания флота, зависящего от характеристик его грузового склада, в данном исследовании использована модель и методика ее использования, описанная в источнике [16]. Предлагаемый метод был включен в эту модель в качестве базового функционального элемента.

Результаты (Results)

Практически все нормативные методики пытаются учесть случайные факторы, приводящие к стохастическим флуктуациям параметров вокруг вычисленного тем или иным способом среднего значения за счет введения коэффициента неравномерности $k_{\text{нер}} > 1$, определяемого как отношение максимального значения в один из анализируемых интервалов времени к среднему значению, рассчитанного на всей совокупности интервалов времени, т. е. $k_{\text{нер}} = \frac{q}{q_{\text{max}}}$. В то же время такой подход связан с возможностью появления непредсказуемых погрешностей и потерь, поскольку указанный коэффициент есть не исходная, а, скорее, расчетная величина, значение которой как раз и должен определить процесс технологического проектирования.

В то же время технологическое проектирование по своей гносеологической сути есть процесс преобразования ограниченного объема исходных данных и представлений в конечный про-

ект, характеризующийся заданной степенью подробности и, соответственно, имеющий несоизмеримо большую размерность данных. Как следствие, разные стадии этого единого процесса также характеризуются разными требованиями к содержанию и степени подробности знаний. Это объясняет необходимость использования на каждом из этапов своих методов анализа вместо поисков единой для всех этапов универсальной модели.

Ни один из рассмотренных методов оценки параметров грузового склада не является лучшим по отношению к другим или отрицающим их результаты. Напротив, все указанные методы образуют взаимодополняющую последовательность уточняющих друг друга инструментов технологического проектирования, возможность применения каждого из которых создается использованием предыдущих в этой последовательности. При этом вносимые каждым из них уточнения относятся не к сдвигу значений основных параметров, а, скорее, ко все более достоверной оценке распределений случайных значений вокруг относительно неизменных центральных значений. Именно это точное распределение позволяет оценивать вероятности потерь *первого рода* (от создания избытка технологических мощностей) и *второго рода* (от их дефицита), что позволяет корректировать проектные решения в зависимости от общих характеристик проекта как объекта предпринимательской деятельности. Именно в этом и состоит новизна и ценность предлагаемого метода.

Кроме того, выстроенная таким образом последовательность использования моделей как методических инструментов позволяет обеспечить доказуемость таких критически важных параметров методики, как валидность и адекватность, а также значительно снижает трудоемкость их калибровки. Без выполнения этих шагов модели имеют ничтожную практическую и даже гносеологическую ценность.

Обсуждение (Discussion)

Предложенная по результатам описываемого исследования последовательность моделей и, соответственно, методов их использования, позволяет получать все более точные представления и оценки параметров склада морского порта. Как результат, это позволяет предложить законченную и непротиворечивую методику оценки этих параметров на всех этапах технологического проектирования и, позднее, управления развитием морских портов.

Результатами каждого отдельного этапа выступают близкие по составу наборы параметров, значения которых также достаточно близки между собой. В то же время получение вероятностных законов распределения ключевых параметров позволяет получать количественные оценки рисков, связанных с коммерческими потерями и выгодами, что представляет собой ценное для практики свойство предлагаемого подхода.

Описываемые в работе методы доведены до практической реализации, осуществленной в форме расчетных модулей пакета технологического проектирования морских портов и терминалов, которые были использованы для решения реальных задач. Полученные результаты дают возможность сделать вывод об адекватности предлагаемых методов, их результативности и эффективности, что позволяет рекомендовать их к использованию при решении соответствующих задач в сфере проектирования объектов инфраструктуры не только портов, но и более общих транспортно-логистических цепей.

Заключение (Conclusion)

Обострение конкуренции на рынке транспортных услуг является не временным явлением, а характеристикой нового этапа систем материального распределения. Коренное изменение состава и уровня требований к характеристикам основных элементов транспортной инфраструктуры и эффективности построенных на их основе логистических цепей заставляет пересматривать методический инструментарий их проектирования. В полной мере это относится к проектированию и управлению работой морскими портами, проектирование которых в нашей стране до сих пор регламентируется нормами, созданными в середине прошлого века. Указанное обстоятельство является объективной предпосылкой для создания новых методов, дополняющих и развивающих

традиционный инструментарий технологического проектирования морских портов и терминалов. Одним из таких инновационных инструментов служит полученный в результате исследования вероятностно-статистический и имитационно-симуляционный метод расчета склада морского порта. Этот инструмент может быть использован для любых торговых портов и терминалов, предназначенных для перевалки самого разного груза: навалочного, генерального, контейнерного.

В основе метода лежит идея постепенного уточнения представлений и данных о проектируемом технологическом элементе, грузовом складе порта или терминала, в ходе процесса проектирования. На разных этапах этого процесса требуются данные о его характеристиках в различных форматах с различной точностью и характеристиками вероятностных разбросов. Сообразно этому предлагаемый метод включает несколько взаимосвязанных этапов — от уточненных традиционных аналитических оценок до вероятностно-статистических экспериментов.

После получения всех значений технологических параметров объекта на завершающих стадиях проектирования в качестве окончательного средства верификации полученных значений исследование предлагает использовать имитационно-симуляционный метод расчета грузового склада терминала, позволяющий получить наиболее полное и достоверное представление о случайных величинах, которыми являются технологические параметры этого объекта.

В исследовании показано, что такая последовательность применения позволяет получить доказательство валидности и адекватности созданной модели, что решает одну из главных задач практической применимости моделирования как метода технологического проектирования.

Наконец, важным с практической точки зрения результатом исследования является создание программных средств и методики их использования в технологическом проектировании морских портов и терминалов, эффективность которых подтверждена опытом использования.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Thorensen C. A.* Port designer's handbook / C.A. Thorensen. — London: Thomas Telford Limited, 2010. — 554 p.
2. UNCTAD Monographs on Port Management. Monograph № 9. Multipurpose port terminals. Recommendations for planning and management. — March 1991.
3. *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. DOI: 10.21821/2309-5180-2015-7-6-7-16.
4. Current issues in shipping, ports and logistics / T. Notteboom (ed.). — Asp/Vubpress/Ура, 2011. — 608 p.
5. *Елисеева А. С.* Принципы организации грузового терминала / А.С. Елисеева. — Ростов-на-Дону: Феникс, 2003. — 329 с.
6. *Kuznetsov A. L.* Simulation Model of Container Land Terminals / A.L. Kuznetsov, A.V. Kirichenko, J.J. Eglit // TransNav. — 2018. — Vol. 12. — No. 2. — Pp. 321–326. DOI: 10.12716/1001.12.02.13.
7. РД 31.3.05-97. Нормы технологического проектирования морских портов. — М., 1998.
8. *Кузнецов А. Л.* О несовершенстве нормативной базы технологического проектирования морских портов / А. Л. Кузнецов, В. А. Погодин // Морские порты. — 2017. — № 6. — С. 18–22.
9. *Щербакова-Слюсаренко В. Н.* Разработка функциональной модели контейнерного терминала типа «сухой порт» и принципов ее использования в технологическом проектировании / В. Н. Щербакова-Слюсаренко, В. А. Погодин, А. С. Ткаченко // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2017. — Т. 9. — № 1. — С. 48–60. DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-1-48-60.
10. *Михаэль Д.* Складская логистика. Новые пути системного планирования / Д. Михаэль; пер. с нем.; под ред. Г. П. Манжосова. — М: КИА центр, 2004. — 136 с.
11. International Handbook of Maritime Economics / K. Cullinane (ed.). — London: Edward Elgar Publishing, 2011. — 520 p.
12. European Commission. Directorate-General for Mobility and Transport. White Paper on Transport: Roadmap to a Single European Transport Area: Towards a Competitive and Resource-efficient Transport System. — Publications Office of the European Union, 2011.

13. Памбухчиянц В. К. Организация, технология и проектирование торговых предприятий / В. К. Памбухчиянц. — М.: ИВЦ «Маркетинг», 1999. — 320 с.
14. Кобзарь А. И. Прикладная математическая статистика / А. И. Кобзарь. — М.: ФИЗМАТЛИТ, 2012. — 813 с.
15. Валькова С. С. Изменение роли грузового склада морского порта в современных транспортно-логистических сетях товаропродвижения / С. С. Валькова // Транспортное дело России. — 2018. — № 3. — С. 110–113.
16. Валькова С. С. Вероятностно-статистический метод расчета вместимости склада морского порта / С. С. Валькова // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2018. — Т. 10. — № 3. — С. 507–519. DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-3-507-519.

REFERENCES

1. Thorensen, C.A. *Port designer's handbook*. London: Thomas Telford Limited, 2010.
2. UNCTAD *Monographs on Port Management. Monograph №9. Multipurpose port terminals. Recommendations for planning and management*. March 1991.
3. 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. DOI: 10.21821/2309-5180-2015-7-6-7-16.
4. Notteboom, Theo, ed. *Current issues in shipping, ports and logistics*. Asp/Vubpress/Upa, 2011.
5. Eliseeva, A.S. *Printsipy organizatsii gruzovogo terminala*. Rostov-na-Donu: Feniks, 2003.
6. Kuznetsov, A.L., A.V. Kirichenko, and J.J. Eglit. "Simulation Model of Container Land Terminals." *TransNav* 12.2 (2018): 321–326. DOI: 10.12716/1001.12.02.13
7. Russian Federation. Guidance Document RD 31.3.05-97. Engineering Design Standards for Seaports. M., 1998.
8. Kuznetsov, A.L., and V.A. Pogodin. "O nesovershenstve normativnoi bazy tekhnologicheskogo proektirovaniya morskikh portov." *Morskije porty* 6 (2017): 18–22.
9. Shcherbakova-Slyusarenko, Victoria N., Vladimir A. Pogodin, and Andrei S. Tkachenko. "The development of the functional model for the "dry port" type container terminal and principles of its use in the technologic design." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova* 9.1 (2017): 48–60. DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-1-48-60.
10. Mikhael', D. *Skladskaya logistika. Novye puti sistemnogo planirovaniya*. Edited by G.P. Manzhosov. M: KIA tsentr, 2004.
11. Cullinane, Kevin, ed. *International handbook of maritime economics*. Edward Elgar Publishing, 2011.
12. European Comission. Directorate-General for Mobility and Transport. *White Paper on Transport: Roadmap to a Single European Transport Area: Towards a Competitive and Resource-efficient Transport System*. Publications Office of the European Union, 2011.
13. Pambukhchiyants, V. K. *Organizatsiya, tekhnologiya i proektirovanie torgovykh predpriyatii*. M.: IVTs «Marketing», 1999.
14. Kobzar', A.I. *Prikladnaya matematicheskaya statistika*. M.: FIZMATLIT, 2012.
15. Valkova, S. "Change of the sea port storage's role in modern logistic supply chain environment." *Transport business of Russia* 3 (2018): 110–113.
16. Valkova, Svetlana S. "Stochastic method for sea port storage capacity calculation." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova* 10.3 (2018): 507–519. DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-3-507-519.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Валькова Светлана Сергеевна — соискатель
 ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала
 С. О. Макарова»
 198035, Российская Федерация, Санкт-Петербург,
 ул. Двинская, 5/7
 e-mail: vlvalkov@yandex.ru, kaf_pgt@gumrf.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Valkova, Svetlana S. — Applicant
 Admiral Makarov State University of Maritime and
 Inland Shipping
 5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg 198035, Russian
 Federation
 e-mail: vlvalkov@yandex.ru, kaf_pgt@gumrf.ru

Статья поступила в редакцию 16 июля 2018 г.

Received: July 16, 2018.

ВОДНЫЕ ПУТИ СООБЩЕНИЯ И ГИДРОГРАФИЯ

DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-4-724-733

ANALYSIS OF DISPLACEMENTS AND DEFORMATIONS OF SHIPPING SHUTTER WALLS

V. A. Kaiuda, M. A. Kolosov, M. L. Kuzmitskiy

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

The article examines the impact of the consolidation of the soils of navigable sluices of the Gorodets hydroelectric complex. It is noted that during the period of consolidation of soils after construction, due to the support on the sand base, the structure settles, taking into account the density of soils at the base of the 38 m chamber and the consolidation of different intensities, as well as the skewing of the chamber and the movement of the top of the walls due to uneven precipitate.

During the operation of locks, movement of the top of the walls of the chambers and uneven precipitation were observed. Calculation studies suggested that the movement of walls is included in the formation and cracks in the zone of interface between the walls and the bottom of the chamber. When felling, the absence of predicted cracks was installed, which cast doubt on the results of calculations and the need to implement an expensive project. An additional analysis was carried out, which includes an assessment of the results of field observations of the deformations of the walls from 1953 to 2017, and a search for the reasons for the movement of the walls was carried out. The analysis of design, construction and operation documentation, data of field measurements and observations, results of previous studies was performed. The estimation of the draft and horizontal displacements of the gateway structures and their mutual displacement is given. The dynamics of the development of the crack from the moment of its detection to the present time has been analyzed. To explain the reasons for the displacement, a hypothesis was voiced about the appearance of through cracks in the zone of interface between the walls and the bottom and calculation was performed. The subsequent opening of the walls showed no through cracks. Three possible reasons for the appearance of wall deformation are considered in the article, the main reason being uneven ground consolidation.

Keywords: navigation lock, lock chamber, consolidation of soil, deformation of walls, cracks.

For citation:

Kaiuda, Viktoria A., Mikhail A. Kolosov, and Mikhail L., Kuzmitskiy. "Analysis of displacements and deformations of shipping shutter walls." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 10.4 (2018): 724–733. DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-4-724-733.

УДК 626.4

АНАЛИЗ ПЕРЕМЕЩЕНИЙ И ДЕФОРМАЦИЙ СТЕН СУДОХОДНОГО ШЛЮЗА

В. А. Каюда, М. А. Колосов, М. Л. Кузьмицкий

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

В статье рассматривается влияние консолидации грунтов судоходных шлюзов Городецкого гидроузла. Отмечается, что в период консолидации грунтов после строительства в связи с опиранием на песчаное основание происходит осадка сооружения с учетом того, что в основании камеры шириной 38 м наблюдается плотность грунтов и консолидация разной интенсивности, а также перекося камеры и перемещение верха стен из-за неравномерных осадок.

В ходе эксплуатации шлюзов было замечено перемещение верха стен камер и неравномерные осадки. Расчетными исследованиями было сделано предположение о том, что перемещение стен заключается в формировании и трещин в зоне сопряжения стен и днища камеры. При вырубке штраба установлено отсутствие прогнозируемых трещин, что поставило под сомнение результаты расчетов и необходимость выполнения дорогостоящего проекта. Выполнен дополнительный анализ, который включает оценку результатов натурных наблюдений за деформациями стен с 1953 г. по 2017 г., а также проведен поиск при-

чин перемещения стен. Выполнен анализ проектной, строительной и эксплуатационной документации, данных натурных измерений и наблюдений, результатов предыдущих исследований. Дана оценка осадки и горизонтальных перемещений конструкций шлюза и их взаимного смещения. Проанализирована динамика развития трещины с момента её обнаружения до настоящего времени. Для объяснения причин перемещения была высказана гипотеза о появлении сквозных трещин в зоне сопряжения стен с днищем и выполнен расчёт. Последующее вскрытие стен показало отсутствие сквозных трещин. В статье рассмотрены три возможных причины появления деформации стен, при этом главной причиной является неравномерная консолидация грунтов основание.

Ключевые слова: судоходный шлюз, камера шлюза, консолидация грунта, деформация стен, трещины.

Для цитирования:

Каюда В. А. Анализ перемещений и деформаций стен судоходного шлюза / В. А. Каюда, М. А. Колосов, М. Л. Кузьмицкий // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2018. — Т. 10. — № 4. — С. 724–733. DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-4-724-733.

Введение (Introduction)

В настоящее время особую актуальность приобрели проблемы строительства новых и реконструкции существующих объектов гидротехнического строительства в районах распространения слабых водонасыщенных грунтов, обусловленные особенностью современного развития районов России. При этом возникают не только технологические трудности, связанные с производством работ в особых условиях распространения слабых грунтов, но и повышенные требования к проектным решениям в этой области как на стадии конструирования, так и расчета.

В ходе эксплуатации Городецких шлюзов было замечено перемещения верха стен камер и неравномерные осадки. Для объяснения причин перемещения была высказана гипотеза о появлении сквозных трещин в зоне сопряжения стен с днищем и выполнен расчёт. Последующее вскрытие стен показало отсутствие сквозных трещин в этой зоне. В статье рассмотрены три возможных причины появления деформации стен, при этом основной причиной является неравномерная консолидация грунтов основания.

Опыт строительства сооружений на пылевато-глинистых грунтах показывает, что осадки сооружений происходят не мгновенно, а развиваются постепенно. В некоторых случаях нарастание осадок продолжается несколько лет, десятилетий и даже столетий.

Городецкие шлюзы включают в себя четыре шлюзовых камеры, между которыми расположена акватория Городецкого судоремонтного завода. Шлюзам верхнего бьефа присвоены номера № 13 и 14, нижнего — № 15 и 16 (рис. 1). В 70-е гг. XX в. шлюзы № 14 и 15 являлись наиболее загруженными по судопотоку и количеству шлюзований на всем Волго-Донском водном пути. Строительство началось 22 апреля 1951 г. Даты ввода шлюзов во временную эксплуатацию: № 13 — 28.04.1956 г., № 14 — 01.06.1956 г., № 15 — 14.08.1955 г., № 16 — 04.11.1955 г. Дата ввода шлюзов в постоянную эксплуатацию — 01.10.1961 г.

Класс судоходных сооружений — 1. Шлюзы железобетонные, однокамерные, двухниточные, докового типа с головной системой наполнения, система опорожнения — через обводные галереи.

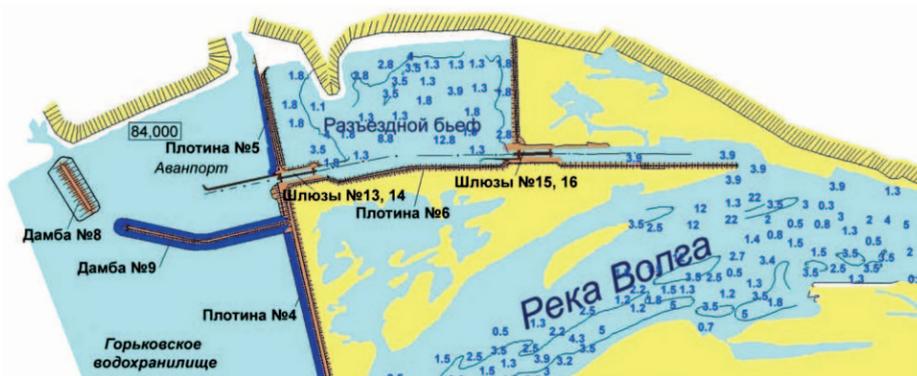


Рис. 1. Компоновка Городецкого (Горьковского) гидроузла

Полезные размеры камер шлюзов: длина: шлюз № 13 — 278,25 м, № 14 — 279,7 м; шлюз № 15 — 279,26 м, № 16 — 278,76 м, ширина: шлюз № 13 — 29,83 м, № 14 — 29,83 м; шлюз № 15 — 29,56 м, № 16 — 29,56 м. Проектная глубина на порогах верхних шлюзов 4,5 – 5,0 м, нижних шлюзов — 3,5 м. При подъеме Чебоксарского водохранилища до отметки 68,0 м гарантированная глубина на порогах нижних шлюзов должна составлять не менее 5,0 м (рис. 2) [1].

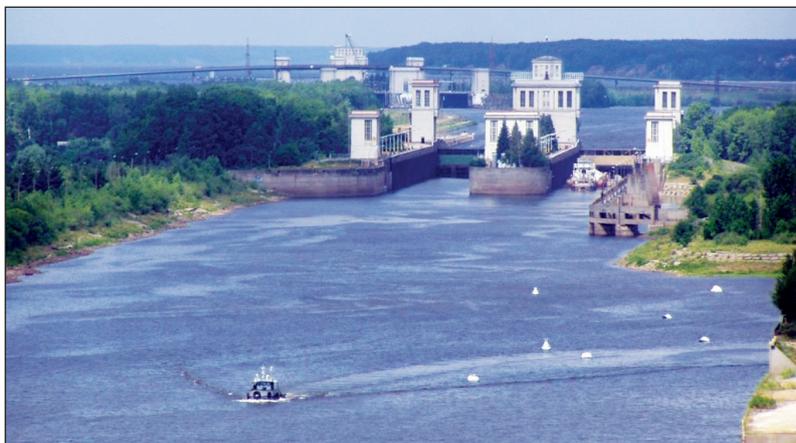


Рис. 2. Общий вид шлюза

Целью исследования является теоретическое обоснование причины перемещения стен, наблюдаемые в начальные периоды эксплуатации Городецких шлюзов.

Методы и материалы (Methods and Materials)

Консолидация — это деформация грунтов в основаниях, которая происходит в период строительства сооружений и завершается после их возведения одновременно или через определенный промежуток времени, после чего ожидается многолетняя стабилизация. Процесс консолидации в основаниях сооружений обусловлен отжатием вод из зернистого скелета грунтов и иногда сопровождается относительной переукладкой части грунта относительно друг друга. Вопросы консолидации грунтов оснований под сооружениями широко исследованы в курсах механики грунтов. Основоположником теории фильтрационной консолидации является К. Терцаги.

Повреждения в конструкциях, вызванные деформациями оснований, наиболее часто проявляются в виде трещин в фундаментах и стенах. Деформации бывают следующих видов:

- осадки-деформации, происходящие в результате уплотнения грунта под воздействием внешних нагрузок, не сопровождающиеся коренным изменением его структуры;
- просадки-деформации, происходящие в результате уплотнения и, как правило, коренного изменения структуры грунта под воздействием внешних нагрузок и дополнительных факторов, таких, как например, замачивание просадочного грунта, оттаивание ледовых прослоек и т. п.;
- набухания и усадки-деформации, связанные с изменением объема некоторых видов глинистых грунтов, например, морозным пучением;
- оседания-деформации земной поверхности, вызванные разработкой полезных ископаемых, изменением гидрогеологических условий и т. п.

Различают следующие виды неравномерных деформаций: прогиб, выгиб, кручение коробки здания, перекося. Причинами этих деформаций могут быть:

- неравномерность удельного давления на грунты оснований под подошвой фундаментов;
- неоднородность и разнопрочность грунтов оснований;
- неоднородность сжимаемости из-за различных факторов;
- влияние горных выработок или отрывки открытых котлованов и траншей вблизи сооружения;
- влияние вибрации.

При обследовании составляют чертежи и фото, характеризующие расположение трещин и других деформаций, их величину и развитие, а также характер раскрытия (кверху или книзу)

Эксплуатационным персоналом гидроузла осуществляются наблюдения, основными из которых в гидротехнической части являются инструментальные измерения уровней воды в пьезометрах, осадок высотных марок, горизонтальных перемещений конструкций и относительных смещений соседних элементов сооружения. Был выполнен анализ данных многолетних наблюдений и материалов предыдущих обследований, проведены работы по исследованию состояния бетона конструкций шлюза. По данным наблюдений на шлюзах Городецкого гидроузла, консолидация грунтов основания завершилась в 1990 г. а также последующие наблюдения показали, что в период 1995 – 2017 гг. перемещений стен не наблюдалось [2], [3].

Результаты (Results)

Анализ деформаций стен судоходного шлюза. Камеры шлюзов представляет собой рамную железобетонную конструкцию (рис. 3). В ходе эксплуатации шлюзов отмечается перемещение верха стен камер и неравномерные осадки [4]. Расчетными исследованиями [2] было сделано предположение о том, что перемещение стен заключается в формировании трещин в зоне сопряжения стен и днища камер.

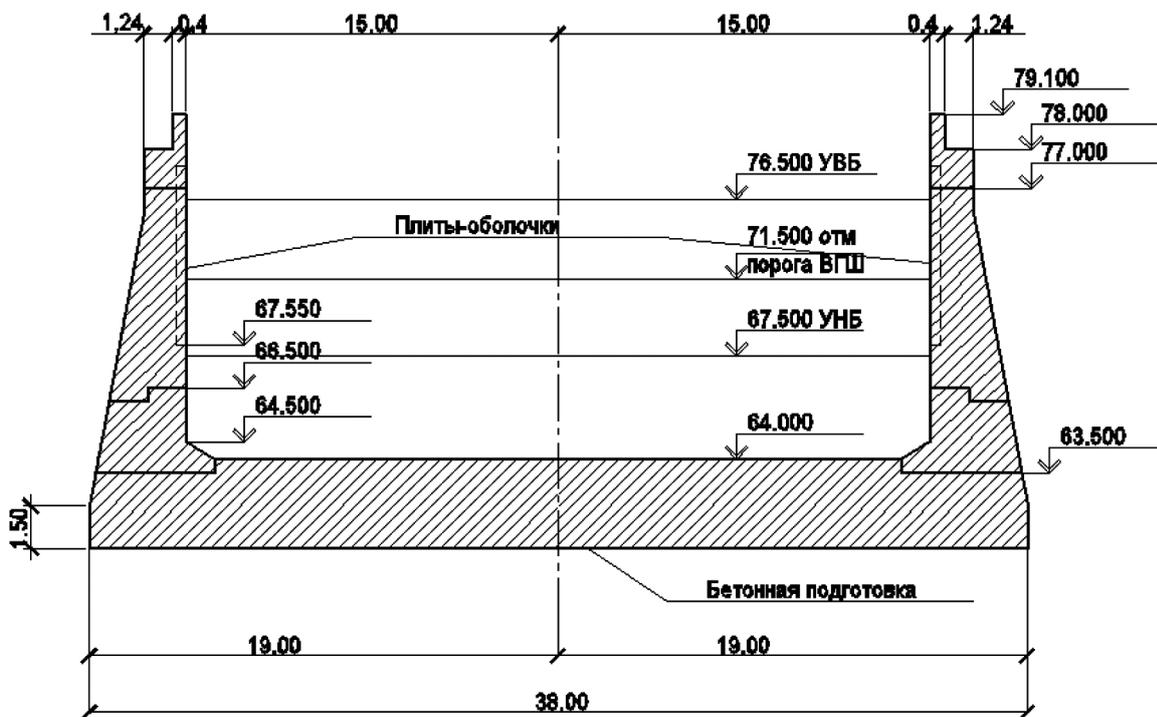
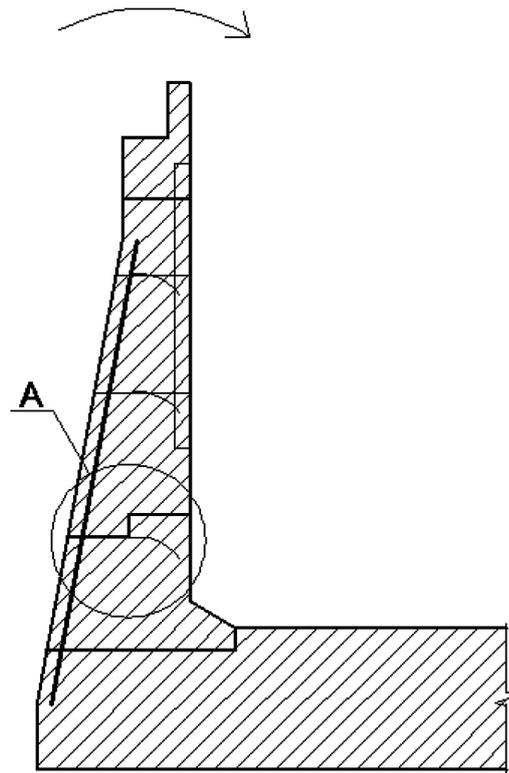


Рис. 3. Поперечный разрез типовых секций № 15 и 16

С помощью проведения расчётов, выполненных с использованием метода конечных элементов [2], было «обнаружено» местоположение трещин в зоне межблочного строительного шва (рис. 4) и даны рекомендации по ремонту. Предложения по ремонту включали установку вертикальных стальных элементов, для чего выполнялась вырубка в лицевой грани стен вертикальных штраб [3], [5]. При этом было установлено отсутствие прогнозируемых трещин, что поставило под сомнение результаты расчетов [2] и необходимость выполнения дорогостоящего проекта [3], [5].

Авторами исследования по заказу ФБУ «Администрация Волжского бассейна» был проведён дополнительный анализ, который включал оценку результатов натурных наблюдений за деформациями стен в период 1953 – 2017 гг., а также поиск причин их перемещения.



Узел А

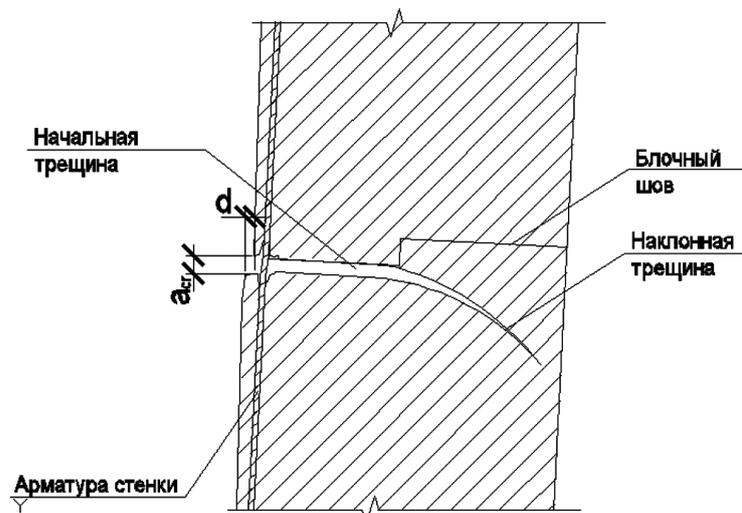


Рис. 4. Схема работы стены камеры шлюза при наличии вторичных трещин

Материалы натурных наблюдений показали, что камеры судоходных шлюзов Городецко-го гидроузла имеют доковую конструкцию и расположены на песчаном деформируемом основании мощностью до 8,0 м. Ниже песков расположены плотные глины и мергели. Камеры шлюзов составлены из секций докового типа. Бетонные стены и днище имеют армированные секции как по тыловой, так и по лицевой грани.

В ходе обследований в 2005 г. обнаружены вертикальные трещины на секциях, а лицевая грань стен камеры, облицованная плитами-оболочками, имеет локальные повреждения. Анализ представленных материалов показал, что вертикальные деформации стен (осадки) характеризуются двумя временными этапами:

– первый этап — осадки, вызванные консолидации песчаных грунтов основания (1953–1959 гг.);

– второй этап — осадки (деформации), вызванные нагрузкой на камеру (наполнение-опорожнение), а также температурным воздействием на лицевую грань стен.

Отмечается разная величина осадок в секциях по правой левой стенке. Горизонтальные деформации стен в основном направлены как в сторону судоходного пролета камер, так и в сторону засыпки, при этом величина отклонения по отдельным секциям колеблется от 0,3 мм до 18,9 мм (шлюз № 15) и от 13,6 мм до 8,15 мм (шлюз № 16). При этом отмечается достаточно устойчивая синхронизация величины осадок и величины перемещения стен. Наиболее интенсивные перемещения и деформации стен с увеличением их значений наблюдались в период с окончания строительства до 2005 г. Более поздние наблюдения до 2017 г. показали, что рост перемещения и рост осадок прекратился, что обусловлено стабилизацией основания.

Возможные причины перемещений железобетонных стен. Для определения причин перемещения железобетонных стен необходимо рассмотреть следующие предположения (гипотезы).

Первая гипотеза — причина перемещений обусловлена нарушением несущей способности стен. Практика таких разрушений стен известна (канал им. Москвы, водный путь Св. Лаврентия, каналы и шлюзы Шванбенгейм в Германии и др.). Как правило, несущая способность стен нарушается после длительного периода эксплуатации в результате локальных повреждений отдельных участков стен и формированием сквозной трещины через все сечения стены. При осушенной камере через сквозную трещину наблюдается фильтрация грунтовых вод из обратной засыпки.

Авторами [2] для объяснения перемещения стен выбрана модель, учитывающая возможность формирования сквозных горизонтальных трещин. Выполнены поверочные расчеты, где в основу заложены трещины, наблюдаемые на лицевой грани (первичные трещины), а основные (вторичные трещины) на тыловой грани «обнаруживаются» расчётным путём. Расчетная величина перемещения стен [2] составляет 35,4 мм, расчетные напряжения в арматуре 174,3 МПа найдены на отметке 66,5 м. Через предполагаемые горизонтальные трещины, обнаруженные на грани шлюзов, фильтрация воды не наблюдалась. Она наблюдалась только через температурно-осадочные швы.

Вторая гипотеза — перемещения представляют собой результат воздействия температурных деформаций стен. Для оценки воздействия температур на деформации используют данные наблюдений за температурой бетона внутри стен шлюзов № 15 – 16 камеры по установленным телетермометрам [6]. Аналитические работы [7] показали, что в результате охлаждения лицевой грани стен камеры сокращается площадь опирания в межблочном шве, что вызывает перераспределение напряжений в бетоне арматуры и приводит к деформациям сооружения. Это явление выявлено также в бетонных плотинах [8], где в результате температурных деформаций лицевой грани происходит раскрытие строительных швов на напорной грани (Саяно-Шушенский, Усть-Илимский г/у).

Анализ, выполненный на основе проведенных наблюдений за деформациями стен Городецких шлюзов, показал, что влияние охлаждения напорной грани (рис. 5) приводит к незначительным перемещениям стен и на несущую способность стен влияния и перемещения не оказывает.

Температурное влияние на перемещение стен может оказывать также промерзания грунта обратной засыпки, что особенно негативно сказывается, если в обратной засыпке имеется включения глины, обладающей свойствами пучинистости. Такое явление особенно негативно сказывается при тонких железобетонных стенах, а засыпка производится глинистым грунтом (Б.-Охтинская плотина, Ленинградская обл.). Обратная засыпка шлюзов Городецкого гидроузла выполнена песком, а толщина стены (см. рис. 3) является достаточной, чтобы исключить промораживание обратной засыпки.

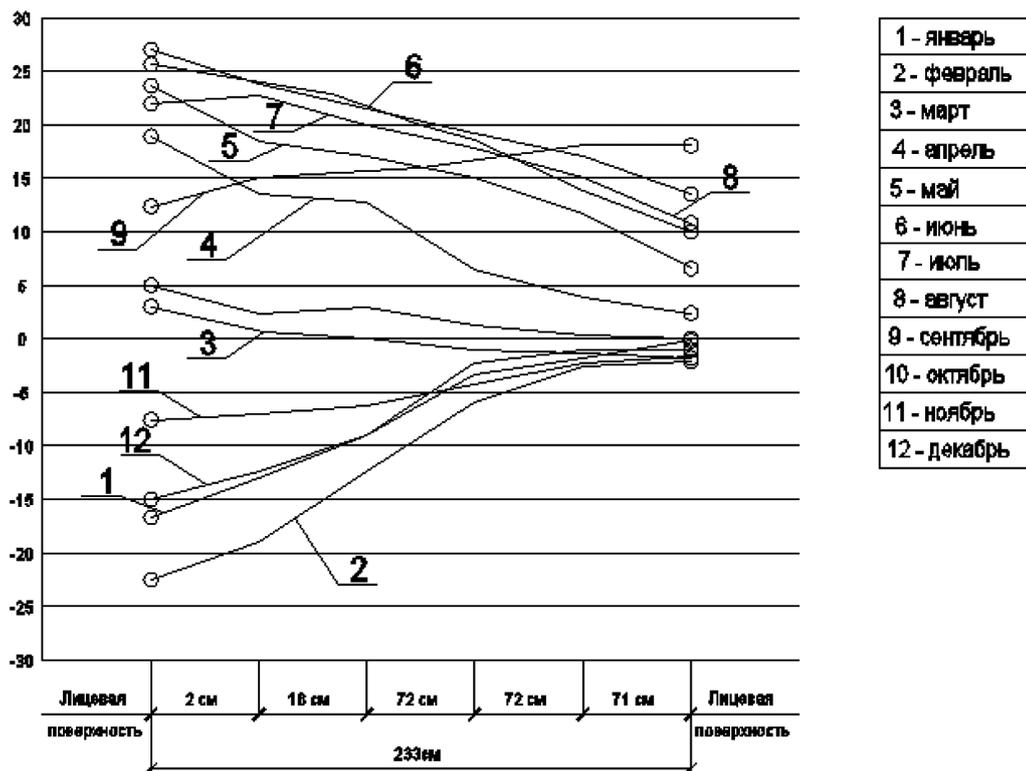


Рис. 5. Распределение температур в бетонных станах шлюза № 15 (третья секция правая сторона)

Третья гипотеза — перемещение стен вызвано неравномерными деформациями основания, что приводит к перекосу жестких армированных конструкций доковых рам (см. рис. 3) и, соответственно, к перемещениям верха стен [9]. Конструктивная связь между стенами и днищем, обусловленная армированием узлов сопряжения, обеспечивает взаимодействие деформаций днища и стен.

Обсуждение (Discussion)

Неравномерность осадок и перекося конструкция камеры как в продольном, так и в поперечном направлении отмечается в отчетах ООО «ЦСКТЭ» [3], однако их взаимосвязи автор не нашли. В результате деформации секций в продольном направлении отмечается появление в стенах временных вертикальных трещин [2], а также раскрытие температурно-осадочных швов с фильтрацией воды через уплотнение. В результате поперечного перекося секций наблюдается перемещение стен, при этом отмечается взаимосвязь «осадка – перемещение». Неравномерные деформации секций могут вызвать вертикальные трещины в стенках, однако влияние осадок на формирование горизонтальных трещин не обнаружено.

Деформации основания наиболее интенсивно происходят в период консолидации грунтов в результате медленного отжатия и выхода воды из песчаных грунтов основания [10]. Этот период наблюдается в течение 2 – 5 лет, после чего происходит стабилизация основания. По данным наблюдений на шлюзах Городецкого гидроузла консолидация грунтов основания завершилась в 1990 году, однако это осталось незамеченным при исследованиях ООО «ЦСКТЭ». Анализ данных натурных наблюдений, представленных в отчете [2], а также последующие наблюдения показали, что в период 1995 – 2017 гг. перемещений стен не наблюдалось, что является показателем отсутствия трещин в стенах.

Исследование процесса консолидации, а также свойств грунтов и их показателей, таких как плотность, прочность, пористость, влажность, коэффициент фильтрации и др., остаются не-

изменно важными для строительства и эксплуатации сооружений. Работы К. Терцаги положили начало становлению теории фильтрационной консолидации, которая в дальнейшем была развита Н. М. Герсевановым, В. А. Флориным, М. А. Цытовичем, Д. Е. Польщиным, С. А. Роза, М. Н. Гольдштейном, Н. Н. Масловым, Н. Н. Веригиным, Ю. К. Зарецким, М. Ю. Абелевым, М. В. Малышевым, А. И. Ксенофонтовым и др. За рубежом фильтрационная теория консолидации получила свое развитие в работах И. Рендулика, Н. Карилло, Р. Баррона, Р. Гибсона, Д. Тейлора, Г. Менделя, В. Мершана и др. Допущения, сделанные К. Терцаги, обусловили значительные расхождения между наблюдаемыми и расчетными значениями деформаций и временем уплотнения водонасыщенных глинистых грунтов [4]. Используя научную базу, современные учёные продолжают свои исследования в данной области как в России [11], так и за рубежом [12].

Выводы (Summary)

1. Расчетный прогноз ООО «ЦСКТЭ», выполненный в 2006 г., о формировании сквозных горизонтальных трещин в стенах не подтверждается результатами анализа наблюдений, которые проводятся в настоящее время.

2. Причиной перемещения стен, наблюдаемых в начальные периоды эксплуатации шлюзов, являются неравномерные деформации основания, вызванные консолидацией песчаных грунтов. Деформации основания вызвали перекосы секций шлюза как в продольном, так и в поперечном направлении. По этой же причине происходило в первые годы разрушение уплотнений в температурно-осадочных швах и наблюдались вертикальные трещины. Начиная с 2000 г. наблюдается завершение периода консолидации грунтов основания и отсутствие деформаций стен камер шлюзов.

3. Проект ремонта камер судоходных шлюзов [5], включающий изготовление вертикальных колон на лицевой грани, выполненных без проведения анализа технического состояния камеры на 2017 г., а также без выполнения прочностных расчетов стен, базируется на ошибочных представлениях. Состояние стен в настоящее время исключает потерю их несущей способности.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Кривошей В. А.* Река Волга (проблемы и решения) / В. А. Кривошей. — М.: ООО «Журнал «РТ», 2015. — 92 с.
2. Исследование причин смещения стен шлюзов Городецкого РГСЧС; этапы 1 – 5 // отчет НИР. — М.: ООО «ПСКТЭ», 2006. — 74 с.
3. Капитальный ремонт шлюзов №13-16 Городецкого РГСЧС: Рабочий проект. — Т. 2 «Разработка мероприятий по гидротехнической части шлюзов». Рабочие чертежи арх. — № 16. — Экз. № 5. — Н. Новгород: ЗАО «Гидрострой-НН», 2006.
4. *Дашко Р. Э.* К проблеме фильтрационной консолидации: структура и свойства воды в глинистых грунтах / Р. Э. Дашко // Грунтоведение. — 2013. — Т. 2. — № 3. — С. 36–47.
5. Капитальный ремонт шлюзов №13-16 Городецкого РГСЧС. Разработка мероприятий по гидротехнической части шлюзов: рабочие чертежи 21066-ГР. — Т. 2. — Самара: ООО «Техтрансстрой», 2012. — 32 с.
6. Натурные исследования с целью разработки рекомендаций по снижению влияния отрицательных температур на бетон: науч.-техн. отчет по теме 79-574. — Л.: ЛИВТ, 1990. — 56 с.
7. *Семенов А. А.* Влияние отрицательных температур на напряженно-деформированное состояние стен камер судоходных шлюзов: автореф. дис. ... канд. техн. наук / А. А. Семенов. — СПб., 2005. — 19 с.
8. *Колосов М. А.* Температурное воздействие на лицевую грань – критериальная нагрузка при оценке безопасности стен камер шлюзов / М. А. Колосов, А. А. Семенов, М. Р. Кашапов // Гидротехника. XXI век. — 2015. — № 3. — С. 66–69.
9. ГОСТ 28570-90 Бетоны. Методы определения прочности по образцам, отобраным из конструкции. — М.: Стандартинформ, 2005. — 10 с.
10. *Поляков В. Л.* Теоретический анализ водообмена между насыщенной и ненасыщенной зонами легких мелкодисперсных грунтов / В. Л. Поляков, Ю. И. Калугин // Гидротехническое строительство. — 2017. — № 6. — С. 46–53.

11. *Shtykov V. I.* The Performance of Geotextile Materials Used for Filtration and Separation in Different Structures as an Important Part of Geotextiles Requirements / V. I. Shtykov, L. S. Blazhko, A. B. Ponomarev // *Procedia engineering*. — 2017. — Vol. 189. — Pp. 247–251. DOI: 10.1016/j.proeng.2017.05.039.

12. *Kumor Ł. A.* Geotechnical parameters of soil, considering the effect of additional compaction of embankment / Ł. A. Kumor, M. K. Kumor, M. Kopka // *Procedia engineering*. — 2017. — Vol. 189. — Pp. 291–297. DOI: 10.1016/j.proeng.2017.05.047.

REFERENCES

1. Krivoshei, V.A. *Reka Volga (problemy i resheniya)*. M.: ООО «Zhurnal «RT», 2015.
2. *Issledovanie prichin smeshcheniya sten shlyuzov Gorodetskogo RGSiS; etap 1, 2, 3, 4, 5: otchet NIR*. M.: ООО «PSKTE», 2006.
3. ZAO «Gidrostroi-NN» «Kapital'nyi remont shlyuzov №13-16 Gorodetskogo RGSiS» *Rabochii projekt. Tom 2 «Razrabotka meropriyatii po gidrotekhnicheskoi chasti shlyuzov»*. *Rabochie chertezhi Arkh. №16. Ekz. №5*. Nizhnii Novgorod, 2006.
4. Dashko, R.E. “K probleme fil'tratsionnoi konsolidatsii: struktura i svoistva vody v glinistykh gruntakh.” *Gruntovedenie* 2.3 (2013): 36–47.
5. *Kapital'nyi remont shlyuzov №13-16 Gorodetskogo RGSiS. Razrabotka meropriyatii po gidrotekhnicheskoi chasti shlyuzov. Rabochie chertezhi 21066-GR. Tom 2*. Samara: ООО «Tekhtransstroj», 2012.
6. *Naturnye issledovaniya s tsel'yu razrabotki rekomendatsii po snizheniyu vliyaniya ot-ritsatel'nykh temperatur na beton. Nauchno-tekhnicheskii otchet po teme 79-574*. L.: LIVT, 1990.
7. Semenov, A.A. Vliyanie otritsatel'nykh temperatur na napryazhenno-deformirovannoe sostoyanie sten kamer sudokhodnykh shlyuzov. Abstract of PhD diss. SPb., 2005.
8. Kolosov, M.A., A.A. Semenov, and M.R. Kashapov. “Temperaturnoe vozdeistvie na litsevuyu gran' – kriterial'naya nagruzka pri otsenke bezopasnosti sten kamer shlyuzov.” *Gidrotekhnika. XXI vek* 3 (2015): 66–69.
9. Russian Federation. State Standard GOST 28570-90. *Betony. Metody opredeleniya prochnosti po obraztsam, otobrannym iz konstruktsii*. M.: Standartinform, 2005.
10. Polyakov, V.L., and Yu.I. Kalugin. “Teoreticheskii analiz vodoobmena mezhdu nasyshchennoi i nenasyschennoi zonami legkikh melkdispersnykh gruntov.” *Gidrotekhnicheskoe stroitel'stvo* 6 (2017): 46–53.
11. Shtykov, V.I., L.S. Blazhko, and A.B. Ponomarev. “The Performance of Geotextile Materials Used for Filtration and Separation in Different Structures as an Important Part of Geotextiles Requirements.” *Procedia engineering* 189 (2017): 247–251. DOI: 10.1016/j.proeng.2017.05.039.
12. Kumor, Łukasz Aleksander, Maciej Kordian Kumor, and Monika Kopka. “Geotechnical parameters of soil, considering the effect of additional compaction of embankment.” *Procedia engineering* 189 (2017): 291–297.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Каюда Виктория Александровна — аспирант
Научный руководитель:
Колосов Михаил Александрович
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала
С.О. Макарова»
198035, Российская Федерация, Санкт-Петербург,
ул. Двинская, 5/7
e-mail: vika.kaiuda@gmail.com,
kaf_gsk@gumrf.ru

Колосов Михаил Александрович —
доктор технических наук, профессор
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала
С.О. Макарова»
198035, Российская Федерация, Санкт-Петербург,
ул. Двинская, 5/7
e-mail: Kolosov-34@mail.ru,
kaf_gsk@gumrf.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Kaiuda, Viktoria A. — Postgraduate
Supervisor:
Kolosov, Mikhail A.
Admiral Makarov State University of Maritime
and Inland Shipping
5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg 198035,
Russian Federation
e-mail: vika.kaiuda@gmail.com,
kaf_gsk@gumrf.ru

Kolosov, Mikhail A. —
Dr. of Technical Sciences, professor
Admiral Makarov State University of Maritime
and Inland Shipping
5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg 198035,
Russian Federation
e-mail: Kolosov-34@mail.ru,
kaf_gsk@gumrf.ru

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

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

*Статья поступила в редакцию 21 июня 2018 г.
Received: June 21, 2018.*

GEOMORPHOLOGY OF THE ARCTIC OCEAN IN THE CONTEXT OF THE UNITED NATIONS CONVENTION ON THE LAW OF THE SEA 1982

A.G. Zinchenko¹, Yu.G. Firsov²

¹ — The All-Russia Scientific Research Institute of Geology and Mineral Resources of the World Ocean named after academician I. S. Gramberg» (VNIIOkeangeologia), St. Petersburg, Russian Federation

² — Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping, St. Petersburg, Russian Federation

The study examines the undersea features classifying problem with concept categorization of the Article 76 United Nations Convention on the Law of the Sea (UNCLOS). The main provisions and regulations in force are covered and discussed. The implementation difficulties are characterized. The study provides a short historical retrospective overview of the Arctic Ocean of creating the bathymetric chart and geomorphologic maps. The importance of the new geomorphologic maps created especially for solving the Russian UNCLOS problem emphasized. The geomorphologic map is compiled at a scale 1:5 000 000 with the UNCLOS concept tin mined and is based on the modern bathymetric data. The reduction of the geomorphologic map is presented and the basic features of map construction are described along with legend creation. The important point of the map construction is the introduction of two forms of continental slopes existed in the Arctic Ocean: simple and complex slopes which are illustrated using the schemes and 3D models. The main attention is paid to the Arctic Basin and a specific area inside it – the Central Arctic Elevation complex. This complex contains along with the positive undersea features such as Lomonosov and Alfa Ridges, Mendeleev Rise and Chukchi Plateau also the separating plains. The proposition that Central Arctic Elevation complex comprise both simple and complex slopes of North-American and North-Asian Continental Margin is advocated. The sub bottom relief 3D models of Arctic Basin varies parts are provided and characterized. The implementation of the digital version of geomorphologic map using varies geo-information technologies is covered. On the base of the geomorphological constructions the continental margin and base of slope zone more detailed position were determined as well as other objects important for the extended continental shelf border definition. Also attention is paid to terminological contradictions.

Keywords: geomorphologic map, geo-information technologies, Arctic Ocean, Arctic Basin, Central Arctic Elevation complex, Article 76 United Nations Convention on the Law of the Sea, continental margin, continental slope, continental rise, base of slope zone, foot of slope, extended continental shelf, United Nations Convention on the Law of the Sea, Scientific Technical Guidelines of the Commission, toponyms of the undersea features.

For citation:

Zinchenko, Anna G., and Yury G. Firsov. "Geomorphology of the Arctic ocean in the context of The United Nations Convention on the law of the sea 1982." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 10.4 (2018): 734–751. DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-4-734-751.

УДК 910.3

ГЕОМОРФОЛОГИЯ ДНА СЕВЕРНОГО ЛЕДОВИТОГО ОКЕАНА В КОНТЕКСТЕ КОНВЕНЦИИ ООН ПО МОРСКОМУ ПРАВУ 1982 Г.

А. Г. Зинченко¹, Ю. Г. Фирсов²

¹ — ФГБУ «Всероссийский научно-исследовательский институт геологии и минеральных ресурсов Мирового океана имени академика И. С. Грамберга» (ФГБУ «ВНИИОкеангеология»), Санкт-Петербург, Российская Федерация

² — ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова», Санкт-Петербург, Российская Федерация

Рассматривается проблема классификации форм рельефа дна Северного Ледовитого океана в категориях ст. 76 Конвенции ООН по морскому праву 1982 г. Приводятся основные положения действующих руководящих документов. Охарактеризованы сложности, возникающие при их реализации.

Дается историческая ретроспектива создания российских и зарубежных батиметрических и геоморфологических карт Северного Ледовитого океана. Отмечается актуальность создания новой специальной геоморфологической карты этого океана в масштабе 1:5 000 000 на основе современных батиметрических данных и в категориях Конвенции. Приводится уменьшенная копия карты, охарактеризованы базовые положения, используемые при ее создании, включая принципы разработки ее легенды. Важное место отведено представлениям о двух типах континентальных склонов — простом и сложном, которые иллюстрируются схемами и объемными моделями. Основное внимание уделено центральной части океана — Арктическому бассейну, и специфике Центрально-Арктической области в его составе, включающей наряду с положительными формами: хребтами Ломоносова и Альфа, поднятием Менделеева и Чукотским плато, разделяющие их равнины и котловины. Обосновано положение о том, что данная область поднятий представляет объединенные в комплексном образовании сложные континентальные склоны североамериканской и североазиатской континентальных окраин. Приводятся объемные модели рельефа различных участков Арктического бассейна, охарактеризованы их особенности. Описано использование электронной версии геоморфологической карты в различных геоинформационных технологиях. На основе выполненных геоморфологических построений представлено уточненное положение континентальных окраин, местоположение основания континентального склона и других объектов, актуальных для обоснования внешней границы континентального шельфа Российской Федерации в Арктике. Обращено внимание на терминологические противоречия в трактовке ряда морфологических и органографических понятий.

Ключевые слова: геоморфологическая карта, геоинформационные технологии, Северный Ледовитый океан, Арктический бассейн, континентальная окраина, расширенный континентальный шельф, типы континентальных склонов, основание континентального склона, подъем, глубоководное океанское дно, абиссальная равнина, топонимы форм рельефа морского дна.

Для цитирования:

Зинченко А. Г. Геоморфология дна Северного Ледовитого океана в контексте Конвенции ООН по морскому праву 1982 г. / А. Г. Зинченко, Ю. Г. Фирсов // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2018. — Т. 10. — № 4. — С. 734–751. DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-4-734-751.

Введение (Introduction)

В последнее время вновь возрос интерес к изучению рельефа дна Северного Ледовитого океана (СЛО). В значительной степени это обусловлено проблемой обоснования внешних границ континентальных шельфов (ВГКШ) приарктических государств. В связи с этим приобретает особое значение не только обновление базы батиметрических данных, но и решение геоморфологических задач, таких как разграничение и классификация объектов морского и океанического дна в соответствии с категориями регламентирующих документов ООН.

На протяжении последних 300 лет Россия всегда имела приоритет в исследованиях СЛО. Наиболее широкомасштабные отечественные гидрографические и геолого-геофизические исследования начались после Второй мировой войны. Так, в 1948 г. советскими исследователями были открыты хребет Ломоносова и срединно-океанический хребет Гаккеля, а в 1949 г. — поднятие Менделеева. История исследований СЛО представлена в отечественных работах [1] – [6], [22], а также в зарубежных публикациях [7] – [10]. Полученные результаты нашли свое отражение в серии мелкомасштабных карт и атласов [11], [12]. Особого упоминания заслуживает составленная в 1963 г. Я. Я. Гаккелем, В. Д. Дибнером, В. М. Литвиным и В. Т. Мартыновым «Геоморфологическая карта Северного Ледовитого океана и его побережий масштаба 1:5 000 000» [2], которая в максимальной степени учитывала гидрографическую изученность СЛО на тот период. Лидером в геолого-геофизическом изучении Арктики являлся Научно-исследовательский институт геологии Арктики (НИИГА), в настоящее время — ФГБУ «ВНИИОкеангеология им. акад. И. С. Грамберга». Институт осуществлял плодотворное сотрудничество с кафедрой гидрографии моря Ленинградского высшего инженерного морского училища им. адм. С. О. Макарова, в настоящее время — Государственный университет морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. Доцент кафедры В. Т. Мартынов являлся автором батиметрических карт окраинных морей СЛО и, в частности, Карского моря. Батиметрическая информация с этих карт

была использована при создании уникальной геоморфологической карты, которая была издана, но, по ряду причин, не представлена широкой научной общественности, и в настоящее время является библиографической редкостью и малоизвестна даже в России. С целью восполнить этот пробел уменьшенное изображение этой карты [2] под ред. В. Д. Дибнера представлено на рис. 1.

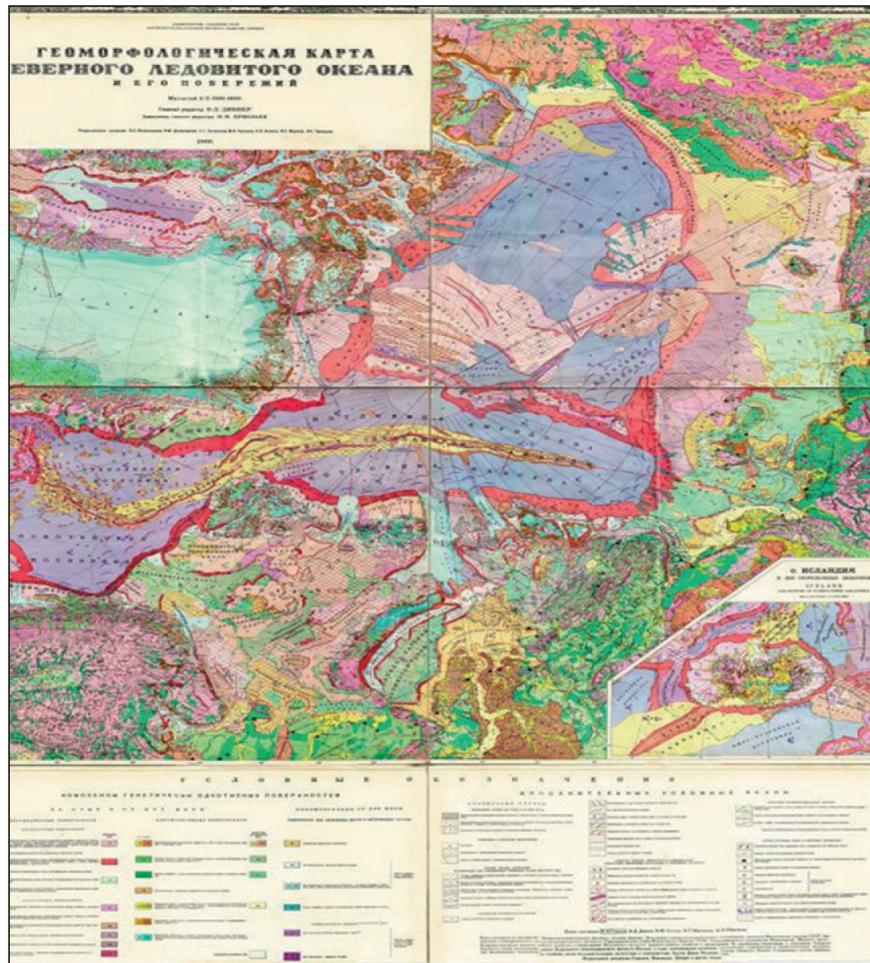


Рис. 1. Геоморфологическая карта Северного Ледовитого океана и его побережий

В основу легенды данной карты был положен принцип выделения генетически однородных поверхностей рельефа. Он позволяет с наибольшей объективностью использовать исходный картографический материал и опираться в большей степени на имеющиеся факты, чем на интерпретацию их теми или иными авторами. В связи с низкой изученностью Арктического бассейна основное внимание было уделено строению дна окраинных арктических морей. За пределами шельфа в Арктическом бассейне были показаны основные морфоструктуры с их привычными сегодня топонимами. Впервые появились и новые для того времени названия форм подводного рельефа, которые ныне, к сожалению, частично утрачены и не попали в Газетир GEBCO. Отметим только некоторые из них: ущелье Сотрудничества (Sortudnichestwa Gap), ущелье Арлис (Arlis Gap), котловина Толля. Газетир GEBCO [13] в настоящее время насчитывает более 190 форм рельефа дна СЛО, среди них 76 топонимов, названных в честь российских исследователей: гидрографов, геологов и геофизиков.

Впоследствии в связи с получением новой батиметрической информации за рубежом были созданы новые карты рельефа дна СЛО [14] – [16], появились также новые отечественные батиметрические карты [17], [18]. В значительной степени их публикации способствовали работы по проблеме ВГКШ. Особое место занимает изданная в 1995 г. «Орографическая карта Арктического бассейна» под ред. Г. Д. Нарышкина [19], [20]. При ее создании был использован предшествующий

ший опыт орографического картографирования СЛО [21], важным следствием которым явилось появление нового термина для обозначения своеобразного трансарктического подводного моста, связывающего противлежащие континенты Северной Америки и Евразии, а именно Центральной области поднятий. В качестве единого объекта она рассматривалась и ранее, но носила менее удачное название Трансарктического мегалато. Сейчас ее чаще называют Центрально-Арктической областью поднятий (ЦАОП). Впервые в масштабе 1:5 000 000 с большой детальностью была представлена геоморфологическая интерпретация рельефа дна центральной части СЛО. Границы были проведены по перегибам поверхности дна. Примечательно, что составление данной карты предшествовало построению батиметрической карты того же масштаба [17], т. е. интерполяция и экстраполяция батиметрических данных осуществлялась на геоморфологической основе. Исторические аспекты создания карт СЛО и описание главных морфоструктур представлены в работе [22]. К последним в составе Евразийского бассейна относятся хребет Гаккеля, котловины Нансена и Амундсена, в составе Американо-Азиатского — хребты Ломоносова и Альфа, поднятие Менделеева, котловины Канадская, Макарова и Подводников, а также Чукотское плато, поднятие Нортунд и некоторые другие.

Среди зарубежных работ, интерпретирующих рельеф дна СЛО с физиографических позиций, следует отметить работу [23], подготовленную на основе Международной батиметрической карты СЛО (ИВСАО) [24]. Выделение отдельных провинций при этом было основано на анализе уклонов дна. Помимо этого авторы привлекли и имеющийся геолого-геофизический материал. Последнее обстоятельство лишило исследование рельефа дна независимого характера. При классификации форм, даже на уровне крупнейших и крупных объектов, в том числе были использованы термины, не предусмотренные ст. 76 Конвенции по морскому праву 1982 г. (далее — Конвенция) [25]. Игнорирование таких элементов, как террасы, склоны и уступы, привело к ошибкам в классификации Чукотской равнины, террасы Кучерова и котловины Подводников. Оказались упущенными седловины — важные переходные элементы в зонах сочленения ЦАОП с сибирским и северо-американским шельфами. Вследствие этого поднятия ЦАОП стали отделены от шельфов подъемами (континентальными подножиями) особого вида, что не нашло подтверждения. Таким образом, эта важная работа стала лишь одним из этапов интерпретации новых батиметрических данных.

Анализ геоморфологических особенностей СЛО в последние годы был выполнен в рамках изучения их в масштабах всего Мирового океана [26]. Эта работа также базировалась на формализованном анализе батиметрических данных с помощью методов ArcGIS. В используемой авторами классификации выделены четыре блока, из которых к СЛО относятся три: шельфы, склоны (имеются в виду континентальные) и абиссальные области. Последние включают в себя и континентальные подножия. Таким образом, в последнюю категорию попали элементы, относящиеся и к подводным окраинам, и к глубоководному океанскому дну, что противоречит положениям Конвенции. Правда, авторы подчеркивают, что целью их построений не является ответ на вопросы, связанные с определением основания континентального склона в рамках проблемы ВГКШ. Среди форм, относящихся к каждому из указанных блоков, террасы присутствуют только в разделе «Склоны», седловины отсутствуют вообще. Это приводит к утрате не только переходных форм в зонах сочленения ЦАОП с шельфами, но и к противоречиям в показе внутреннего строения поднятий. Так, террасы имеются в составе «нагорья» хребта Ломоносова, но их нет в «нагорьях» поднятия Менделеева и хребта Альфа, в то время как эти два поднятия представлены системами террас (ступеней). К недостаткам данной работы следует отнести и включение в классификацию генетических характеристик, а также расширенное понимание термина «каньоны». Так, в категорию гляциальных попали все желоба Баренцево-Карского шельфа и Канадского Арктического архипелага, хотя авторы допускают и тектонические причины их возникновения. К каньонам оказались причислены практически все подводные долины, включая тектонические ущелья, тропи и проходы. В категории абиссальных равнин оказались днища всех котловин и впадин, в том числе входящих в состав ЦАОП, несмотря на их морфологические и батиметрические различия. Таким

образом, карта геоморфологических характеристик Северного Ледовитого океана, представленная в данной работе, имеет ряд серьезных упущений и не отвечает задачам ВГКШ.

Новое направление в отечественных батиметрических и геоморфологических исследованиях дна СЛО связано с использованием научно-исследовательских подводных лодок на локальных полигонах [27]. Однако для регионального изучения морфологии эти данные пока несущественны.

Решение задач ВГКШ потребовало обобщения последней батиметрической информации и интерпретации ее в категориях Конвенции [25] и Научно-технического руководства (НТР) [41]. Исходя из этих условий, во ВНИИОкеангеология под редакцией Г. Э. Грикурова была составлена Геоморфологическая карта СЛО масштаба 1:5 000 000 [22], [28], использованная в дальнейшем в «Частичном пересмотренном Представлении Российской Федерации в Комиссию по границам континентального шельфа в отношении континентального шельфа Российской Федерации в Северном Ледовитом океане 2015 г.» [29] (далее — Представление). Одной из целей при этом было разграничение подводных континентальных окраин и глубоководного океанского дна в СЛО. С этих позиций требовалось определить принципиальное положение зоны основания континентального склона (ОКС), поскольку именно в ней отыскивается одна из важнейших характеристик границ расширенного континентального шельфа прибрежного государства — подножие континентального склона (ПКС). В этой связи основными концептуальными источниками при формировании легенды новой геоморфологической карты явились зарубежная публикация [30] и отечественные работы [31] – [35].

Основная часть (Main Part)

В ходе работ по подготовке геоморфологической карты были учтены результаты предшествующих исследований, сделанных в Советском Союзе и России, и в их развитие предложены новые решения на основе разработок ВНИИОкеангеология и имеющегося мирового опыта. Одной из главных задач при этом стало обоснование выводов о компонентах ЦАОП как о естественном продолжении континентальной окраины. Предваряя рассмотрение этой проблемы, необходимо остановиться на понятиях и определениях, предлагаемых Конвенцией и НТР Комиссии по границам континентального шельфа. Основными из имеющих отношение к определению геоморфологических границ пассивных континентальных окраин (именно они имеют место в СЛО) являются следующие:

– *подводная окраина материка* «включает находящееся под водой продолжение континентального массива прибрежного государства и состоит из поверхности и недр шельфа, склона и подъема. Подводная окраина не включает дно океана на больших глубинах, в том числе океанические хребты» [25, п. 3 ст. 76];

– *континентальный склон* — «внешний участок материковой окраины, простирающийся от кромки шельфа до вершины подъема, а если подъем отсутствует, то до верхнего окончания глубоководного океанского ложа» [41, п. 5.4.4]; равноправно в руководящих документах используется сокращенный термин «склон» (Slope);

– *континентальный подъем* «обычно представляет собой клиновидное осадочное тело с меньшим уклоном, чем склон» [41, п. 5.4.4]; равноправно используется термин «подъем» (Rise), оба термина обозначают континентальное подножие;

– *основание континентального склона (ОКС)* — «это зона, в которой нижняя часть склона внедряется в вершину континентального подъема, а если подъем отсутствует, то в верхнюю оконечность глубоководного океанского ложа» [41, п. 6.2.2];

– *абиссальные равнины* представляют собой плоские ровные области океанского дна, обычно расположенные на глубинах свыше 4000 м [13].

Юридическая терминология, применяемая в перечисленных документах, специфична и бывает отличной от обычно используемой в морской геологии. Например, следует различать понятия *шельфа* как части материковой окраины и *континентального шельфа прибрежного государства*, поскольку последний, согласно [41, п. 2.1.1], включает в себя морское дно и недра подводных рай-

онов, простирающихся за пределы его территориального моря на всем протяжении естественно-продолжения его сухопутной территории до внешней границы подводной окраины материка. Особое внимание в Конвенции и НТР уделяется океаническим и подводным хребтам, а также подводным возвышенностям, причем только последние могут рассматриваться как естественные компоненты континентальной окраины [41, п. 7.1.2] и др. Данное положение имеет прямое отношение к классификации морфоструктур ЦАОП.

Первоначально решение поставленных задач по созданию геоморфологической карты осуществлялось на базе международного батиметрического грида ИВСаО [24, в. 2 и 3], а также отечественных батиметрических съемок, выполненных с применением многолучевого эхолота [22]. Кроме того, привлекались материалы Государственной геологической карты РФ и геологических карт сопредельных площадей масштаба 1:1 000 000 [32], [33] и др. Результатом выполненной работы стала созданная в 2015 г. во ВНИИОкеангеология «Геоморфологическая карта Северного Ледовитого океана» масштаба 1:5 000 000 [22], [27]. Являясь картой специального назначения, она, главным образом, характеризует, основные объекты, имеющие значение для решения задач ВГКШ: континентальные окраины, глубоководное океанское дно. При этом существенным является то, что геоморфологические построения опираются исключительно на батиметрические материалы. Это делает карту независимой от прочих геолого-геофизических данных и позволяет снизить влияние априорных генетических представлений. Такой подход отвечает рекомендациям о приоритете морфологических и батиметрических данных [41, п. 5.4.6].

Технология построения карты базируется на принципах отечественной школы аналитического геоморфологического картографирования и современных подходах к его реализации [40]. Границы отдельных поверхностей проводятся по линиям перегиба поверхности дна. Одним из важных новых решений стало использование и дальнейшее развитие концепции существования простых и сложных континентальных склонов, которая ранее была разработана на примере хорошо изученных областей Мирового океана [30].

В соответствии с терминологией ст. 76 Конвенции [25] и рекомендациями НТР, легенда карты разделена на два основных блока: континентальной окраины и глубоководного дна океана (рис. 2).



Рис. 2. Легенда геоморфологической карты

Легенда также содержит блок вспомогательной информации, в частности наименования относительно мелких форм, которые не приведены на карте. К сожалению, до настоящего времени вопросы топонимики СЛО не урегулированы. В отечественной и зарубежной картографии

и литературе используются разные термины, объекты с одинаковыми наименованиями рассматриваются в разных границах. Примерами могут служить котловины Подводников и Макарова. Первый топоним употребляется преимущественно в отечественной практике, иностранными специалистами для обозначения этого объекта, но в несколько иных контурах, используется термин «равнина Врангеля». Что касается котловины Макарова, то нами она понимается в границах самой глубокой части, в то время как за рубежом ее границы распространяют южнее и включают равнину Врангеля. В данной работе использованы топонимы, приведенные на последней отечественной батиметрической карте [18]. Основные блоки легенды содержат компоненты нескольких уровней. В составе континентальной окраины определены шельф, склон и подъем, в составе глубоководного дна океана идентифицированы глубоководные равнины и срединный океанический хребет. Шельф охарактеризован настолько схематично, насколько это было необходимо для решения поставленных задач.

Принципиальным решением было разделение континентальных склонов на *простые* и *сложные*. Под простыми континентальными склонами понимаются те, которые начинаются от бровки шельфа и без существенных осложнений в профиле прослеживаются вниз до подъема, а в случае его отсутствия — до абиссальных равнин (рис. 3, дополненный и модифицированный по [30]). Трассирование бровки шельфа — выпуклого перегиба профиля дна, за которым начинается отчетливое нарастание глубин в сторону океана, обычно не вызывает серьезных затруднений. Со времени, когда она была зафиксирована в СЛЮ Г. Д. Нарышкиным [20], положение бровки шельфа не претерпело больших изменений.



Рис. 3. Схема строения простого (а) и сложного (б) континентальных склонов

Сложные континентальные склоны также начинаются от бровки шельфа, но характеризуются разнообразием осложняющих их форм рельефа: седловин, террас, возвышенностей, гряд, понижений, трогов и проходов. Континентальный склон при этом оказывается разделенным ими на большее или меньшее количество частных склонов. Количество, сочетание и последовательность осложняющих элементов могут быть самыми разнообразными, но неизменно ниже бровки шельфа располагается верхняя (в профиле) часть континентального склона — внутренний склон,

а по периферии континентального склона его нижняя часть — внешний склон. Заключенные между ними и осложняющими формами прочие фрагменты континентального склона носят название *промежуточных* (рис. 3, б). Сложные континентальные склоны могут иметь причудливую конфигурацию, достигать большой ширины, а их основание может находиться весьма далеко от бровки шельфа.

Представления о сложном типе континентальных склонов складывались постепенно. Вначале обращалось внимание на то, что континентальный склон оказывается разделенным на части там, где имеют место плато и террасы [34] – [37]. Отмечалось также ступенчатое строение сбросово-глыбовых континентальных склонов Европы и Юго-Западной Африки, одним из проявлений которого являются осложняющие склон краевые плато [38]. Особенное развитие и более глубокую проработку взгляды на сложные континентальные склоны получили в связи с проблемой делимитации границ континентальных шельфов. Было выявлено, что помимо плато и террас, континентальные склоны могут содержать и другие осложняющие элементы, например, седловины и трюги [30]. Как показало выполненное нами геоморфологическое картографирование СЛО для целей ВГКШ, список осложняющих элементов может быть пополнен за счет гряд, возвышенностей, понижений и др. Попытки разделить склоны СЛО на два типа были также реализованы во ВНИИОкеангеология А. Г. Зинченко при составлении листов геологической карты масштаба 1:1 000 000 на площадь дна, выходящую за бровку шельфа [32], [33] и др. Применительно к задачам ВГКШ в СЛО в целом первый опыт использования данного подхода принадлежит Г. Э. Грикурову, В. П. Поселову и Х. Брекке в презентации, представленной на рабочем совещании арктических государств (Норвегия, Ставангер, 2013). Простые склоны в СЛО распространены вдоль бровки шельфов морей Баренцева, Карского и Лаптевых (рис. 4 и 5), а также шельфов США и отчасти Канады, сложные склоны в основном присущи ЦАОП.



Рис. 4. Фрагмент Евразийской континентальной окраины в зоне сочленения простого и сложного типов континентальных склонов

В виде картографического документа представления о двух видах континентальных склонов впервые реализованы на геоморфологической карте СЛО в масштабе 1: 5 000 000, представленной на рис. 5 в уменьшенном виде (условные обозначения см. на рис. 2).

ЦАОП давно рассматривается отечественными исследователями в качестве единого орографического образования [19] – [21], [34], [39] и др., объединяющего хребет Ломоносова, поднятие Менделеева, хребет Альфа, Чукотское плато, поднятие Нуртуинд, а также разделяющие их депрессии. В виде своеобразного трансарктического «моста» ЦАОП простирается между противоположащими Гренландско-Канадским и Восточно-Сибирско-Чукотским шельфами. Трехмерное изображение ЦАОП представлено на рис. 6.

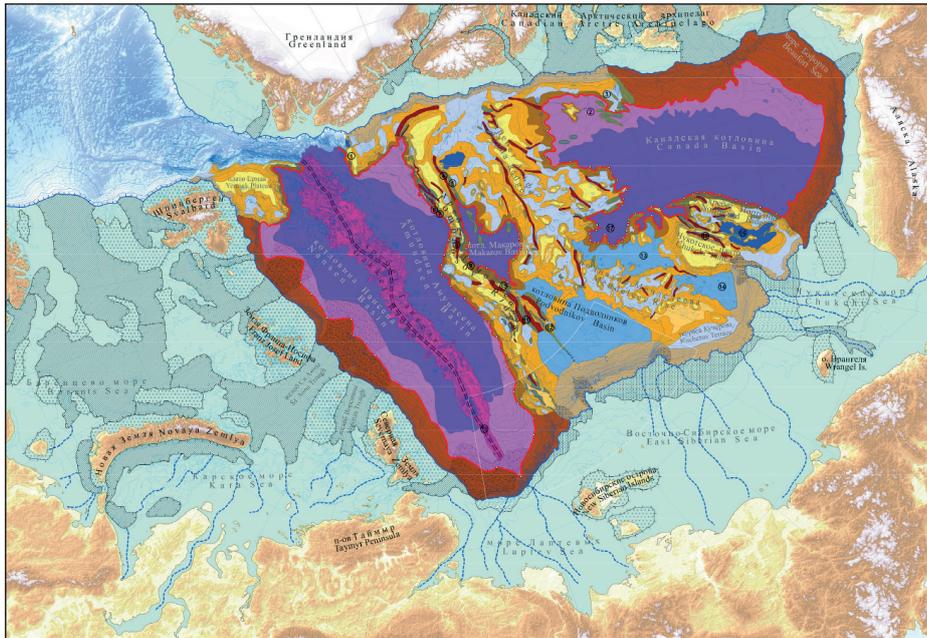


Рис. 5. Геоморфологическая карта Северного Ледовитого океана масштаба 1:5 000 000

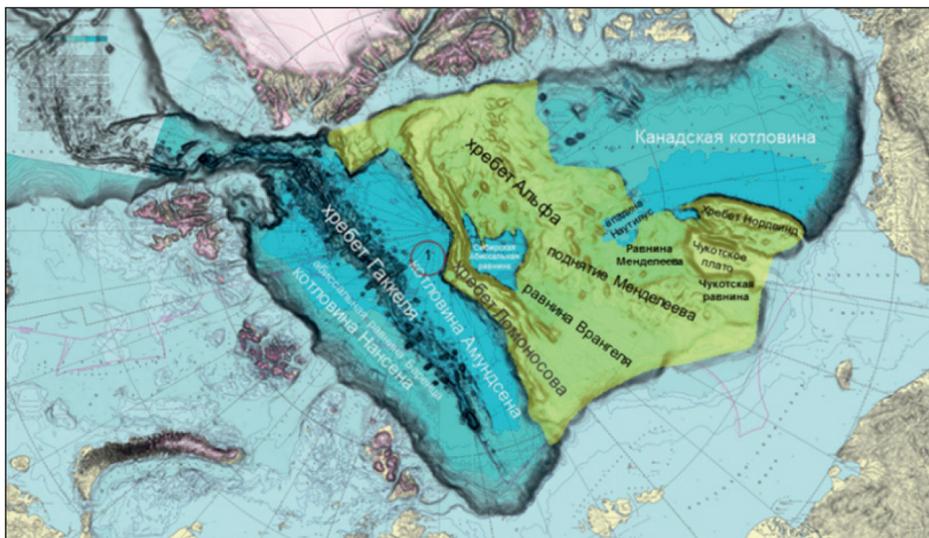


Рис. 6. Трехмерное представление Центрально-Арктической области поднятий (выделено желтым цветом): 1 — Полярная абиссальная равнина

Важное место в классификации рельефа дна СЛО занимает вопрос об абиссальных равнинах, которые представляют собой плоские ровные области океанского дна, обычно расположенные на глубинах свыше 4000 м [13] и др. Однако батиметрические показатели не являются исчерпывающими для определения абиссальных равнин в СЛО, где отметки свыше 4000 м встречаются только в самых глубоких частях котловин Нансена, Амундсена и Канадской. Геоморфологические же границы проводятся вдоль линий перегиба поперечного профиля дна, а не вдоль изобат с теми или иными значениями, и потому могут иметь переменные значения глубин. При этом они могут не совпадать с изобатой 4000 м, ограничивая более широкие пространства с меньшими глубинами, например, до 3600 м. В СЛО эти границы образуют по периметру равнин дна котловин замкнутый или почти замкнутый контур. В итоге самые глубокие равнины по-

всеместно оказываются окруженными теми или иными восходящими поверхностями, а именно: континентальными склонами, наклонными равнинами подъема или склонами срединно-океанического хребта Гаккеля.

Таким образом, абиссальные равнины занимают среди всех обширных плоских равнин СЛО самое низкое батиметрическое положение и представляют собой нижние поверхности по системно-морфологической классификации элементарных поверхностей А. Н. Ласточкина [40]. Такое расположение, по нашему мнению, является важным диагностическим признаком абиссальных равнин. Географические определения и термины, присвоенные тем или иным формам рельефа на предшествующих этапах изучения СЛО, не являются основанием для определения положения ОКС. В [41, п. 7.1.8] для целей [25, ст. 76] положение, касающееся ранее данных названий, специально оговорено применительно к подводным возвышенностям и хребтам, но, по-видимому, оно также должно быть справедливо и для других объектов дна. Из-за неравномерной и недостаточной гидрографической изученности, к настоящему времени в СЛО абиссальными оказались названы равнины с разными батиметрическими характеристиками и морфологией.

В Газетире ГЕВСО [13] абиссальными названы равнины двух видов. К первому виду относятся равнины: Баренца (с глубинами 3800 – 3900 м) в котловине Нансена; Полярная (свыше 4200 м глубиной) в котловине Амундсена; Сибирская (свыше 3800 м) в котловине Макарова и Канадская в днище Канадской котловины (свыше 3800 м), занимающие самые глубокие части котловин и окруженные восходящими склонами, ко второму виду относятся: равнина Врангеля в южной части котловины Подводников с отметками 2600 – 3000 м; Чукотская равнина, расположенная между поднятием Менделеева и Чукотским плато с отметками 2200 – 2400 м; равнина Менделеева, заключенная между поднятием Менделеева, Чукотским плато и бассейном Наутилус, которая характеризуется отметками глубин 3000 – 3400 м. При этом все равнины второго вида представляют собой террасы, т. е. промежуточные ступени дна с восходящим тыловым и нисходящим фронтальными склонами. С нашей точки зрения, ни с батиметрических, ни с морфологических позиций они не соответствуют определению абиссальных равнин и, соответственно, не могут быть отнесены к глубоководному океанскому дну в категориях Конвенции и НТР.

ЦАОП, помимо поднятий дна, включает разделяющие их депрессии: котловины Подводников и Макарова, а также две безымянные впадины, дно которых занимают равнины Чукотская и Менделеева. При этом две последние представляют собой системы, состоящие из нескольких террас, в то время как дно котловины Макарова со всех сторон окружено восходящими склонами, т. е. является нижней замкнутой поверхностью [40]. Это обстоятельство, а также глубины 3800 – 4000 м позволяют с позиций Конвенции и НТР отнести дно котловины Макарова к глубоководному океанскому дну и признать правомерность отнесения находящейся в ее днище Сибирской равнины к категории абиссальных. Таким образом, ЦАОП, в геоморфологическом отношении представляющая собой сложный континентальный склон, включает в себя анклав глубоководного океанского дна в котловине Макарова.

Поднятия ЦАОП имеют более сложное внутреннее строение, чем депрессии. Так, на хребте Ломоносова, помимо вершинных плато, широко развиты террасы, гряды, седловины, трог и проходы, в основном, вытянутые вдоль простирающегося этого горного сооружения. На его отдельных участках имеют место серии отрогов, разделенных глубокими долинами или трогами. В зоне сочленения этого хребта с шельфом Восточно-Сибирского моря внутренний склон опирается на седловину с глубинами площадки около 1600 м, которая примерно на 1200 м ниже бровки шельфа, но при этом более чем на 2000 м возвышается над основанием западного склона хребта в котловине Амундсена и почти на 1000 м — над его основанием в котловине Подводников. Восточный нисходящий склон седловины без ясно выраженной границы в плане смыкается с внутренним склоном в котловине Подводников. Что касается западного нисходящего склона седловины, то он плавно переходит в простой континентальный склон, замыкающий с юга Евразийский бассейн. Отсутствие в рельефе четко выраженной границы подчеркивает морфологическое единство хребта с шельфовой частью континентальной окраины. Характерно, что отходящий от хребта отрог

Геофизиков и лежащий на его продолжении слабо выраженный уступ отделяют часть котловины, которая несколько приподнята над остальным дном. Вместе со встречными выступами внутреннего континентального склона это свидетельствует в пользу еще более широких связей хребта Ломоносова с шельфом.

Поднятие Менделеева представляет собой серию ступеней или террас, последовательно погружающихся в северном и северо-восточном направлении. Поднятие целиком входит в состав сложного континентального склона, основание которого находится по периферии бассейна Наутилус. Ступени поднятия осложнены возвышенностями и горами. Характерны трог и понижения, обусловленные грабенами. Зона сочленения данного поднятия с шельфом представлена внутренним склоном, опирающимся на обширную структурную террасу Кучерова. Ниже нее, отделенная промежуточным склоном, располагается седловина, связывающая основную часть поднятия с зоной сочленения. Ступени депрессии, сопряженной с поднятием на востоке, продолжаются в его пределах, сливаясь с его террасами. Таким образом, проявляется морфологическое единство всей ЦАОП, внутренняя дифференциация которой обусловлена ее блоковым строением. При этом наблюдается общая тенденция последовательного понижения поверхности дна в направлении от шельфов, обусловленная неравномерным погружением составляющих данную область тектонических блоков. Троги, проходы, долины отражают участки вероятного растяжения земной коры, представляя собой отрицательные линейные формы с отчетливыми склонами, высота которых меняется от 200 до 1000 м, а в некоторых случаях (например, в ущелье Марвин) оказывается еще большей.

Возвращаясь к частям сложных склонов, следует отметить, что внутренний склон, располагающийся непосредственно мористее бровки шельфа, имеет в ЦАОП различную высоту: большую на контакте с впадинами и меньшую в зонах контакта с поднятиями. Во впадинах внутренний склон опирается на террасы, а на поднятиях — на седловины или террасы. Наличие более или менее отчетливо выраженной седловины в основании внутреннего склона является общей особенностью зон сочленения поднятий с шельфами. Седловины одновременно несут в себе признаки связи и раздела между соседствующими с ними объектами. Степень проявления того или иного из этих показателей определяется высотой площадки седловины над прилегающими депрессиями и глубиной ее погружения относительно сопредельных поднятий. О том, что при контакте поднятий ЦАОП с российским шельфом превалирует связь, свидетельствует тот факт, что седловины значительно выше приподняты над дном сопредельных котловин, чем погружены относительно бровки шельфа и плато поднятий. Таким образом, связь поднятий с Восточно-Сибирско-Чукотским шельфом в профиле и в плане выражена вполне определенно. Поднятия не отделены от шельфа объектами, которые можно было бы отнести к глубоководному океанскому дну в терминах Конвенции и НТР. Поднятия являются частью материковых окраин в составе континентальных склонов сложного строения.

Подъем в СЛО распространен неравномерно. Там, где имеет место особенно мощный вынос осадочного материала с континента, например, против устьев крупных шельфовых желобов или больших подводных долин, получили развитие конусы выноса (фэны). Их дистальные окончания могут простираться далеко в пределы абиссальных равнин. Напротив, в условиях дефицита осадков подъем развит слабо. Он практически отсутствует у приполюсной части хребта Ломоносова (как со стороны котловины Амундсена, так и со стороны котловины Макарова), а также у поднятия Нортунд и к востоку от него — у континентального склона Аляски. Углы наклона подъема в СЛО в среднем составляют около $0,3^\circ$, но могут достигать $0,5^\circ$ и более в зависимости от местных условий [43]. Обычно наклон постепенно уменьшается в направлении абиссальных равнин.

С позиций представлений о том, что ЦАОП, за исключением котловины Макарова, является частью континентальной окраины, было выявлено принципиальное положение ОКС: при наличии подъема — на контакте с ним, а при его отсутствии — на контакте с абиссальной равниной. В обоих случаях имеет место более или менее выраженный перегиб поверхности дна, где и отыскивается ОКС. Определение основания простых континентальных склонов обычно не встречает

серьезных затруднений, за исключением участков, с глубокими каньонами, а также при наличии обширных конусов выноса, лишаящих профиль склона явных перегибов. Что касается сложных континентальных склонов, то для выявления их основания необходимо проследить всю цепочку составляющих их элементов от бровки шельфа до внешних склонов на границе с подъемом или абиссальной равниной, т. е. в направлении сверху вниз, а затем в обратном порядке — снизу вверх. Геоморфологическое картографирование и анализ профильных батиметрических данных позволили определить принципиальное положение ОКС в системе крупнейших и крупных элементов рельефа дна СЛО (рис. 7).

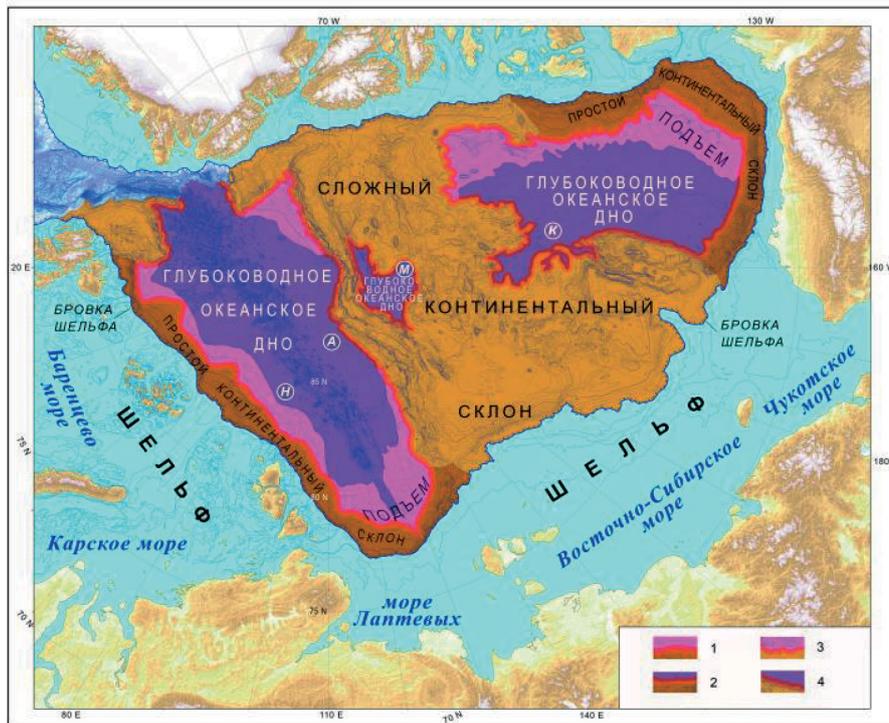


Рис. 7. Карта-схема распространения континентальных склонов простого и сложного строения, глубоководного океанского дна и принципиальное положение ОКС в СЛО.

Условные обозначения: принципиальное положение ОКС на границе:

1 — простого континентального склона и подъема;

2 — простого континентального склона и абиссальной равнины;

3 — сложного континентального склона и подъема;

4 — сложного континентального склона и абиссальной равнины;

абиссальные равнины: *H* — в котловине Нансена; *A* — в котловине Амундсена;

M — в котловине Макарова; *K* — в Канадской котловине и бассейне Наутилус

ЦАОП находится внутри контура ОКС, за исключением анклава котловины Макарова, который по ее периметру очерчен замкнутым контуром ОКС. Это единственная область внутри ЦАОП, где имеются основания для отыскания ПКС. Поднятия ЦАОП — части сложного континентального склона — с позиций Конвенции [25] и НТР [41, пп. 7.1.4 и 7.3] трактуются как подводные возвышенности, которые являются естественными компонентами материковой окраины, такими, как «плато, поднятия, вздутия, банки и отроги». Определение конкретного местоположения ОКС решается путем анализа перегибов профиля дна на батиметрических и профилях. В российском Представлении для этих целей используется программный пакет GeoCAR [42].

Созданная первоначально в бумажном варианте геоморфологическая карта впоследствии была оцифрована и включена в качестве составной части в проекты геоинформационных систем ArcGIS (ESRI) и GeoCAR. Все расчеты по обоснованию расширенного континентального шельфа России в Арктике выполнены в программном пакете GeoCAR [42]. Электронная модель Арктиче-

ского бассейна с элементами нагрузки геоморфологической карты в среде программного пакета GeoCAR показана на рис. 8. Такое представление позволяет наглядно видеть, что все точки ПКС, использованные для обоснования расширенного континентального шельфа России в Арктике, находятся в пределах зоны ОКС. Включение геоморфологической карты в ГИС-проект дает возможность осуществлять разнообразные виды моделирования и изучать особенности проявления геологической структуры в рельефе дна, как показано на рис. 9 (условные обозначения см. на рис. 2).

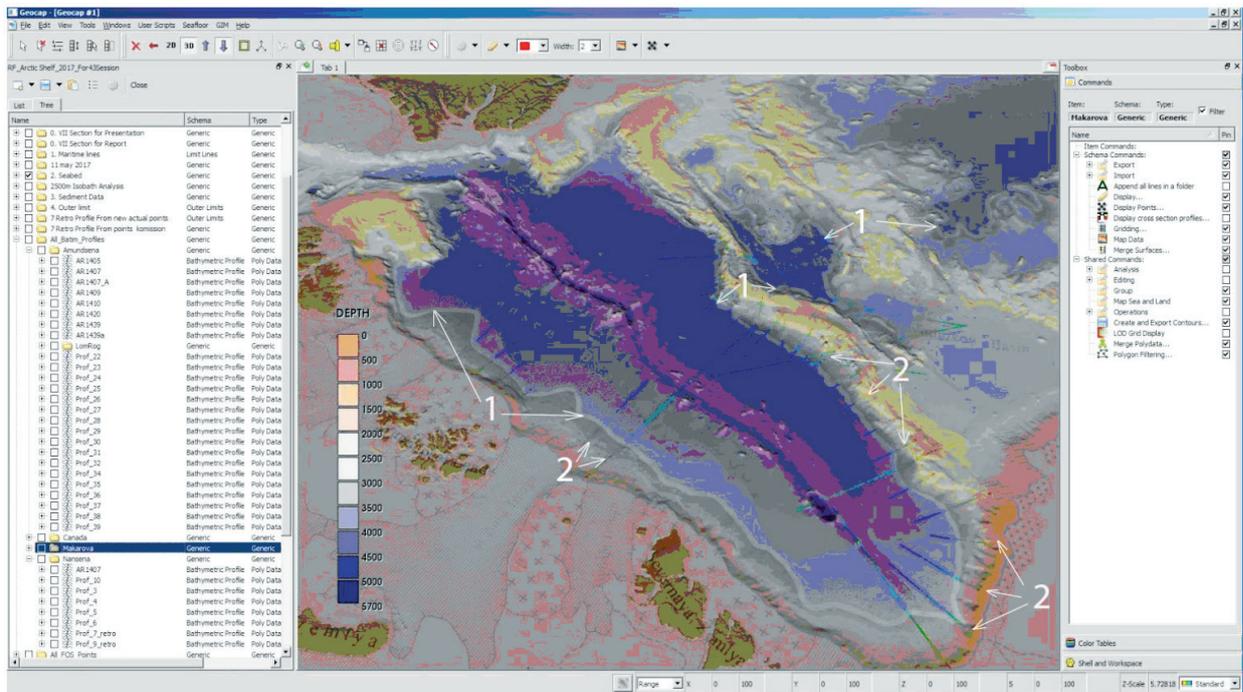


Рис. 8. Электронная модель Арктического бассейна с элементами геоморфологии в среде программного пакета GeoCAR:

- 1 — зоны ОКС в котловинах Нансена, Амундсена, Макарова и Канадской;
2 — на батиметрических профилях показаны точки ПКС, располагающиеся в пределах зон ОКС

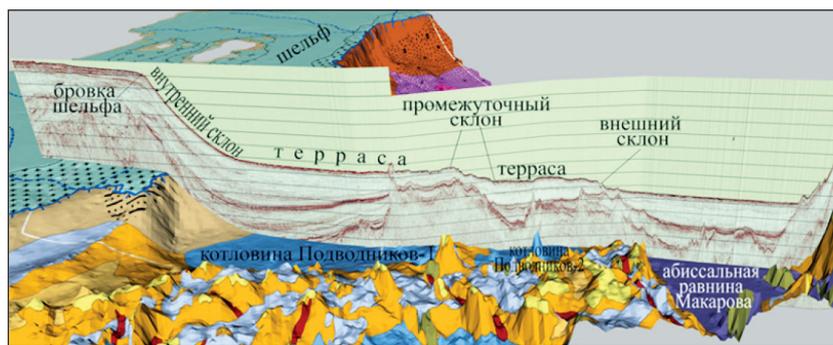


Рис. 9. Пример совмещения сейсмического профиля с объемной геоморфологической моделью

Применение программного пакета GeoCAR для изучения связей геологических структур с рельефом дна является новым подходом в геоморфологических исследованиях.

Выводы (Summary)

1. Геоморфологическая карта является важным компонентом частичного пересмотренного Представления России на расширенный континентальный шельф в Арктике. В отличие от бати-

метрической модели, она характеризует составные элементы, которые образуют поверхность дна и комплексы этих элементов в их естественных границах, представленных перегибами поверхности дна, в то время как на батиметрических картах такие границы отсутствуют.

2. Геоморфологическая карта (модель) обеспечивает более обоснованные заключения о строении дна Арктического бассейна в российской зоне СЛО в категориях ст. 76 Конвенции.

3. Геоморфологическая модель позволила с помощью независимой методики выявить принципиальное положение зоны ОКС, дополнительно подтвердив правильность анализа батиметрических профилей и определения точек ПКС.

4. Геоморфологическая модель российской зоны СЛО дала возможность подтвердить и уточнить ранее сделанные основные принципиальные выводы о террасированном характере дна котловины Подводников, а также равнин Чукотской и Менделеева.

5. Котловина Подводников входит в состав континентального склона сложного строения, заключенного между бровкой шельфа и дном котловины Макарова; применение термина «абиссальная равнина» к дну котловины Подводников неправомерно.

6. Дно равнин Врангеля, Чукотской и Менделеева не может быть отнесено к категории океанского дна по морфометрическим показателям, так как характеризуется глубинами 2600 – 3600 м, в то время как абиссальные равнины определяются как «обширные, плоские или слегка наклонные области, как правило, на глубинах более 4000 м».

7. Сложные склоны с их элементами в Арктическом бассейне образуют область Центрально-Арктических поднятий — природный «мост» который не разъединяет, а соединяет северные континентальные окраины Евразии и Северной Америки; при этом хребет Ломоносова и поднятие Менделеева, в соответствии с положениями Конвенции и НТР, рассматриваются как естественные продолжения континентальной окраины, а котловина Макарова — как анклав океанского дна.

8. Дальнейшее развитие геоморфологического картографирования СЛО будет основываться на постоянном пополнении базы батиметрических данных за счет развития современных высокоточных съемок, совершенствовании методики комплексного анализа геолого-геофизических и геоморфологических материалов при широком использовании ГИС-технологий, а также сохранении и развитии традиций отечественной геоморфологической школы.

Авторы выражают глубокую признательность редактору Геоморфологической карты СЛО масштаба 1:5 000 000 Г. Э. Грикурову и руководителю работ по программе ВГКШ во ВНИИОкеангеология, заместителю директора В. А. Поселову, а также искреннюю благодарность коллегам М. В. Иванову и Е. А. Зыкову за помощь в разработке моделей и подготовке иллюстраций.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гаккель Я. Я. Морфоструктура и донные осадки Арктического бассейна / Я. Я. Гаккель, Н. А. Белов, В. Д. Дибнер, Н. Н. Лапина // Тр. Арктического и антарктического научно-исследовательского института. — 1968. — Т. 285. — С. 15–27.

2. Дибнер В. Д. Геоморфологическая карта Северного Ледовитого океана / В. Д. Дибнер, Я. Я. Гаккель, В. М. Литвин [и др.] // Тр. Науч.-исслед. ин-та геол. Арктики. — М.: Недра, 1965. — Т. 143. — С. 341–345.

3. Киселев Ю. Г. Глубинная геология Арктического бассейна / Ю. Г. Киселев. — М.: Недра, 1986. — 224 с.

4. Остенсо Н. Континентальные окраины в Северном Ледовитом океане / Н. Остенсо // Геология континентальных окраин. — 1979. — Т. 3. — С. 101–112.

5. Рассохо А. И. Подводный срединный Арктический хребет и его место в системе хребтов Северного Ледовитого океана / А. И. Рассохо, Л. И. Сенчура, Р. М. Деменицкая [и др.] // Доклады Академии наук СССР. — 1967. — Т. 172. — № 3. — С. 659–662.

6. Трешников А. Ф. Географические наименования основных частей рельефа дна Арктического Бассейна / А. Ф. Трешников, Л. Л. Балакшин, Н. А. Белов [и др.] // Проблемы Арктики и Антарктики. — 1967. — № 27. — С. 5–15.

7. *Beal M. A.* The floor of the Arctic Ocean: geographic names / M. A. Beal, F. Edvalson, K. Hunkins, A. Molloy, N. Ostenso // *Arctic*. — 1966. — Vol. 19. — No. 3. — Pp. 214–219. DOI: 10.14430/arctic3430.
8. *Johnson G. L.* Arctic Basin Morphology / G. L. Johnson, P. T. Taylor, P. R. Vogt, J. F. Sweeney // *Polarforschung*. — 1978. — Vol. 48. — № 1/2. — Pp. 20–30.
9. *Weber J. R.* Maps of the Arctic Basin sea floor: a history of bathymetry and its interpretation / J. R. Weber // *Arctic*. — 1983. — Vol. 36. — No. 2. — Pp. 121–142.
10. *Weber J. R.* Geophysical and Geological Exploration in the Arctic Ocean Region: Summary of the most Important Expeditions and Surveys that have Contributed to Geophysical and Geological Knowledge of the Arctic Ocean / J. R. Weber, E. F. Roots // *Marine Geology*. — 1990. — Vol. 93. — Pp. 1–13. DOI: 10.1016/0025-3227(90)90075-U.
11. Атлас океанов. Северный Ледовитый океан. — ГУНиО МО СССР, 1980. — 190 с.
12. Атлас Арктики. — М.: ГУГК 1985. — 204 с.
13. General Bathymetric Chart of the Ocean (GEBCO). Undersea Feature Names. [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://www.ngdc.noaa.gov/gazetteer/> (дата обращения: 06.11.2017).
14. *Heezen B. C.* Arctic Ocean Floor (Bathymetric Compilers) / B. C. Heezen, M. Tharp. — National Geographic Society, 1971. — Scale 1:9 757 000.
15. *Heezen B. C.* Arctic Ocean Floor / B. C. Heezen // *Supplement to National Geographic magazine*. — 1971. — Vol. 140. — No. 4.
16. *Heezen B. C.* Map of the Arctic Region / B. C. Heezen, M. Tharp, M. Pinther. — 1975. — World 1:5 000 000.
17. Рельеф дна Северного Ледовитого океана. Масштаб 1:5 000 000, проекция стереограф. — СПб.: Изд-во ГУНиО МО, ВНИИОкеангеология, РАН, 1998.
18. Центральный Арктический бассейн. Масштаб 1:2 500 000, по параллели 75 °. Проекция стереограф. — СПб.: Изд-во ГУНиО МО РФ, 2002. — № 91115.
19. Объяснительная записка к картам Арктического бассейна: Орографическая карта Арктического бассейна, Рельеф Северного Ледовитого океана. — СПб.: Изд-во ВНИИОкеангеология, 1999. — 38 с.
20. Орографическая карта Арктического бассейна. Масштаб 1:5 000 000 / Отв. ред. И. С. Грамберг, Г. Д. Нарышкин. — Хельсинки, Карттакеус, 1995.
21. *Ласточкин А. Н.* Орографическая схема Северного Ледовитого океана / А. Н. Ласточкин, Г. Д. Нарышкин // *Вестник ЛГУ. Сер. 7*. — 1989. — № 2. — С. 45–54.
22. Арктический бассейн (геология и морфология) / под ред. В. Д. Каминский. — СПб.: Изд-во ВНИИОкеангеология, 2017. — 291 с.
23. *Jakobsson M.* Physiographic provinces of the Arctic Ocean seafloor / M. Jakobsson, A. Grantz, Y. Kristoffersen, R. Macnab // *Geological Society of America Bulletin*. — 2003. — V. 115. — No. 12. — Pp. 1443–1455. DOI: 10.1130/B25216.1.
24. International Bathymetric Chart of the Arctic Ocean. [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://www.ngdc.noaa.gov/mgg/bathymetry/arctic/> (дата обращения: 06.11.2017).
25. Конвенция Организации Объединенных Наций по морскому праву. [Электронный ресурс]. — Режим доступа: http://www.un.org/depts/los/convention_agreements/texts/unclos/unclos_r.pdf (дата обращения: 08.11.2017).
26. *Harris P. T.* Geomorphology of the oceans / P. T. Harris, M. Macmillan-Lawler, J. Rupp, E. K. Baker // *Marine Geology*. — 2014. — Vol. 352. — Pp. 4–24. DOI: 10.1016/j.margeo.2014.01.011.
27. *Сколотнев С. Г.* Новые данные о геологическом строении юго-западной части поднятия Менделеева (Северный Ледовитый океан) / С. Г. Сколотнев, М. А. Федункин, А. В. Корнийчук // *Доклады Академии наук*. — 2017. — Т. 476. — № 2. — С. 190–196. DOI: 10.7868/S0869565217260152.
28. *Geologic Structures of the Arctic Basin* / Editors: Piskarev, Alexey, Poselov, Victor, Kaminsky, Valery (Eds.) // Springer, 2018. — P. 375. [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://www.springer.com/us/book/9783319777412> (дата обращения: 11.08.2018).
29. Частичное пересмотренное Представление Российской Федерации в Комиссию по границам континентального шельфа в отношении континентального шельфа Российской Федерации в Северном Ледовитом океане. [Электронный ресурс]. — Режим доступа: http://www.un.org/depts/los/clcs_new/submissions_files/rus01_rev15/2015_08_03_Exec_Summary_Russian.pdf (дата обращения: 08.11.2017).
30. *Symonds Ph. A.* Characteristics of Continental Margins / Ph. A. Symonds, O. Eldholm, J. Mascle, G. F. Moore // *Continental Shelf Limits: The Scientific and Legal Interface*; P. J. Cook, Ch. M. Carleton (Ed). — Oxford University Press, 2000. — Pp. 25–63.

31. Зинченко А. Г. Орографическое деление и общая характеристика рельефа дна // Геология и полезные ископаемые России / А. Г. Зинченко; под ред. И. С. Грамберга, В. Л. Иванова, Ю. Е. Погребницкого. — СПб.: Изд-во ВСЕГЕИ, 2004. — Т. 5. — Кн. 1: Арктические моря. — С. 15–25.
32. Рекант П. В. Геологическая карта. Масштаб 1:1 000 000. Серия Океанская. Лист U-53, 54, 55, 56 — хр. Ломоносова. Объяснительная записка / П. В. Рекант, Е. А. Гусев, А. А. Черных [и др.]. — СПб.: Картографическая фабрика ВСЕГЕИ, 2011. — 66 с. + 15 вкл.
33. Пяткова М. Н. Государственная геологическая карта Российской Федерации. Масштаб 1:1 000 000 (третье поколение). Серии Лаптево-Сибироморская и Океанская. Лист Т-57-60 — о. Генриетты. Объяснительная записка / М. Н. Пяткова, В. А. Виноградов, А. И. Трухалев [и др.]. — СПб.: Картографическая фабрика ВСЕГЕИ, 2015. — 68 с. + 4 вкл.
34. Кулаков Ю. Н. Морфоструктура бассейна Северного Ледовитого океана / Ю. Н. Кулаков, В. Д. Дибнер, Б. Х. Егиазаров, Ю. Б. Казмин // Структура и история развития Северного Ледовитого океана. — Л.: Изд-во ПГО Севморгеология, 1986. — С. 40–53.
35. Погребницкий Ю. Е. Тектоническое районирование Центрально-Арктического бассейна / Ю. Е. Погребницкий, Ю. В. Горячев, А. И. Трухалев // Разведка и охрана недр. — 2005. — № 6. — С. 24–27.
36. Симонов Ю. Г. Геоморфология / Ю. Г. Симонов. — СПб.: Питер, 2005. — 427 с.
37. Хаин В. Е. Континентальные склоны: морфология, тектоника, глубинное строение и ресурсы / В. Е. Хаин, Л. И. Лобковский // Актуальные проблемы океанологии. — 2003. — С. 63–83.
38. Леонтьев О. К. Материковый склон как планетарная морфоструктура / О. К. Леонтьев, Д. Е. Гершанович, Б. Н. Котенев // Геоморфология. — 1986. — № 2. — С. 3–16.
39. Нарышкин Г. Д. Геоморфологические аспекты внешней границы континентального шельфа России в Арктике / Г. Д. Нарышкин, А. А. Комарицын, А. В. Каврайский [и др.]. — СПб.: Изд-во ГУНиО, 2005. — 60 с.
40. Ласточкин А. Н. Системно-морфологическое основание наук о Земле (геотопология, структурная география и общая теория геосистем) / А. Н. Ласточкин. — СПб.: Изд-во НИИХИ, 2002. — 762 с.
41. Научно-техническое руководство Комиссии по границам континентального шельфа // Нью-Йорк, 1999 г., офиц. пер. на рус. яз. — 90 с.
42. Фирсов Ю. Г. Цифровые модели рельефа дна и анализ батиметрических профилей для формирования внешней границы континентального шельфа России в Арктике / Ю. Г. Фирсов // Интерэкспо Гео-Сибирь. — 2011. — С. 152–162.
43. Алексеев С. П. Континентальное подножие Арктического бассейна / С. П. Алексеев, А. Б. Костенич, А. Г. Ставров [и др.] // Арктика: экология и экономика. — 2012. — № 1(5). — С. 82–91.

REFERENCE

1. Gakkel, Ya.Ya, N.A. Belov, V.D. Dibner, and N.N. Lapin. “Morfostruktura i Donnie osadki Arkticheskogo Basseina.” *Trudy Arkticheskogo i antarkticheskogo nauchno-issledovatel'skogo instituta* 285 (1968): 15–27.
2. Dibner, V.D., Ya.Ya. Gakkel', V.M. Litvin, V.T. Martynov, and N.L. Shurgaeva. “Geomorfologicheskaya karta Severnogo Ledovitogo okeana.” *Tr. Nauch.-issled. in-ta geol. Arktiki. Vol. 143*. M.: «Nedra», 1965. 341–345.
3. Kiselev, Yu.G. *Glubinnaya geologiya Arkticheskogo basseina*. M.: Nedra, 1986.
4. Ostenso, N. “Kontinental'nye okrainy v Severnom Ledovitom okeane.” *Geologiya kontinental'nykh okrain. Vol. 3*. M., 1979. 101–112.
5. Rassokho, A.I., L.I. Senchura, R.M. Demenitskaya, A.M. Karasik, Yu.G. Kiselev, and N.K. Timoshenko. “Podvodnyi sredinnyi Arkticheskii khrebet i ego mesto v sisteme khrebtov Severnogo Ledovitogo okeana.” *Doklady Akademii nauk SSSR* 172.3 (1967): 659–662.
6. Treshnikov, A.F., L.L. Balakshin, N.A. Belov, R.M. Demenitskaya, V.D. Dibner, A.M. Karasik, A.O. Shpalkher, and N.D. Shurgaeva. “Geograficheskie naimenovaniya osnovnykh chastei rel'efa dna Arkticheskogo Basseina.” *Problemy Arktiki i Antarktiki* 27 (1967): 5–15.
7. Beal, M. A., F. Edvalson, K. Hunkins, A. Molloy, and N. Ostenso. “The floor of the Arctic Ocean: geographic names.” *Arctic* 19.3 (1966): 214–219. DOI: 10.14430/arctic3430.
8. Johnson, Galen, P.T. Taylor, P.R. Vogt, and J.F. Sweeney. “Arctic basin morphology.” *Polarforschung* 48.1/2 (1978): 20–30.
9. Weber, J. R. “Maps of the Arctic Basin sea floor: a history of bathymetry and its interpretation.” *Arctic* 36.2 (1983): 121–142.

10. Weber, J. R., and E. F. Roots. "Geophysical and geological exploration in the Arctic Ocean region: Summary of the most important expeditions and surveys that have contributed to geophysical and geological knowledge of the Arctic Ocean." *Marine Geology* 93 (1990): 1–13. DOI: 10.1016/0025-3227(90)90075-U.
11. *Atlas okeanov. Severnyi Ledovityi okean*. GUNiO MO SSSR, 1980.
12. *Atlas Arktiki GUGK*. M.: 1985.
13. General Bathymetric Chart of the Ocean (GEBCO). Undersea Feature Names. Web. 6 Nov. 2017 <<https://www.ngdc.noaa.gov/gazetteer/>>.
14. Heezen, B.C., and M. Tharp. *Arctic Ocean Floor (Bathymetric Compilers)*. National Geographic Society, 1971. Scale 1:9 757 000.
15. Heezen, B. C. "Arctic Ocean Floor." *Supplement to National Geographic magazine* 140.4 (1971).
16. Heezen, B. C., M. Tharp, and M. Pinther. *Map of the Arctic Region*. 1975. World 1:5,000,000.
17. *Relief dna Severnogo Ledovitogo okeana. Masshtab 1:5 000 000, proekcija stereograficheskaja*. SPb.: GUNiO MO, VNIIOkeangeologija, RAN, 1998.
18. *Centralnyj Arkticheskij bassejn. Masshtab 1:2 500 000, po paralleli 75°. Proekcija stereograficheskaja*. SPb.: GUNiO MO RF, 2002. № 91115.
19. *Ob"yasnitel'naya zapiska k kartam Arkticheskogo basseina: Orograficheskaya karta Arkticheskogo basseina, Rel'ef Severnogo Ledovitogo okeana*. SPb.: VNIIOkeangeologiya, 1999.
20. Gramberg, I.S., and G.D. Naryshkin, eds. *Orograficheskaya karta Arkticheskogo basseina*. Masshtab 1:5 000 000. Khel'sinki, Karttakesus, 1995.
21. Lastochkin, A.N., and G.D. Naryshkin. "Orograficheskaya skhema Severnogo Ledovitogo okeana." *Vestnik LGU. Ser.7 2* (1989): 45–54.
22. Kaminskii, V.D., ed. *Arkticheskii bassein (geologiya i morfologiya)*. SPb.: VNIIO-keangeologiya, 2017.
23. Jakobsson, M., A. Grantz, Y. Kristoffersen, and R. Macnab. "Physiographic provinces of the Arctic Ocean seafloor." *Geological Society of America Bulletin* 115.12 (2003): 1443–1455. DOI: 10.1130/B25216.1
24. International Bathymetric Chart of the Arctic Ocean. Web. 6 Nov. 2017 <<https://www.ngdc.noaa.gov/mgg/bathymetry/arctic/>>.
25. Konventsiya Organizatsii Ob"edinennykh Natsii po morskomu pravu. Web. 8 Nov. 2017 <http://www.un.org/depts/los/convention_agreements/texts/unclos/unclos_r.pdf>.
26. *Harris P. T. Geomorphology of the oceans / P. T. Harris, M. Macmillan-Lawler, J. Rupp, E. K. Baker // Marine Geology*. — 2014. — Vol. 352. — Pp. 4–24. DOI: 10.1016/j.margeo.2014.01.011.
27. Skolotnev, S.G., M.A. Fedonkin, and A.V. Korniyuchuk. "New data on the geological structure of the southwestern Mendeleev Rise, Arctic Ocean." *Doklady Earth Sciences* 476.1 (2017): 1001–1006.
28. *Geologic Structures of the Arctic Basin*. /Editors: Piskarev, Alexey, Poselov, Victor, Kaminsky, Valery (Eds.) //Springer, 2018. — p. 375. [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://www.springer.com/us/book/9783319777412> (дата обращения: 11.08.2018).
29. *Chastichnoe peresmotrennoe predstavlenie Rossiiskoi Federatsii v Komissiyu po granitsam kontinental'nogo shel'fa v otnoshenii kontinental'nogo shel'fa Rossiiskoi Federatsii v Severnom Ledovitom okeane*. Web. 8 Nov. 2017 <http://www.un.org/depts/los/clcs_new/submissions_files/rus01_rev15/2015_08_03_Exec_Summary_Russian.pdf>.
30. Symonds, Ph.A., O. Eldholm, J. Mascle, and G.F. Moore. "Characteristics of Continental Margins." *Continental Shelf Limits: The Scientific and Legal Interface*. Edited by P.J. Cook, Ch.M. Carleton. Oxford University Press, 2000. 25–63.
31. Zinchenko, A.G. "Orograficheskoe delenie i obshchaya kharakteristika rel'efa dna." *Geologiya i poleznye iskopaemye Rossii. T. 5. Kn.1. Arkticheskije moray*. Edited by I.S. Gramberg, V.L. Ivanov, Yu.E. Pogrebetskii. SPb.: Izd-vo VSEGEI, 2004. 15–25.
32. Rekant, P.V., E.A. Gusev, A.A. Chernykh, and A.G. Zinchenko. *Geologicheskaya karta*. Masshtab 1:1 000 000. Seriya Okeanskaya. List U-53, 54, 55, 56 – khr. Lomonosova. Ob"yasnitel'naya zapiska. SPb.: Kartograficheskaya fabrika VSEGEI, 2011.
33. Pyatkova, M.N., V.A. Vinogradov, A.I. Trukhalev, Yu.E. Pogrebetskii, S.A. Bondarenko, Yu.V. Goryachev, E.A. Gusev, A.G. Zinchenko, E.A. Zykov, M.A. Medvedeva, O.I. Suprunenko, A.A. Chernykh, and N.V. Shustova. *Gosudarstvennaya geologicheskaya karta Rossiiskoi Federatsii*. Masshtab 1:1 000 000 (tret'e pokolenie). Serii Laptevo-Sibromorskaya i Okeanskaya. List T-57-60 - o. Genrietty. Ob"yasnitel'naya zapiska. SPb.: Kartograficheskaya fabrika VSEGEI, 2015.

34. Kulakov, Yu.N., V.D. Dibner, B.Kh. Egiazarov, and Yu.B. Kazmin. "Morfostruktura basseina Severnogo Ledovitogo okeana." *Struktura i istoriya razvitiya Severnogo Ledovitogo okeana*. L.: PGO Sevmorgeologiya, 1986. 40–53.
35. Pogrebitskii, Yu.E., Yu.V. Goryachev, and A.I. Trukhalev. "Tektonicheskoe raionirovanie Tsentral'no-Arkticheskogo basseina." *Razvedka i okhrana nedr* 6 (2005): 24–27.
36. Simonov, Yu.G. *Geomorfologiya*. SPb.: Piter, 2005.
37. Khain, V.E., and L.I. Lobkovskii. "Kontinental'nye sklony: morfologiya, tektonika, glubinnoe stroenie i resursy." *Aktual'nye problemy okeanologii*. M.: Nauka, 2003. 63–83.
38. Leont'ev, O.K., D.E. Gershanovich, and B.N. Kotenev. "Materikovyi sklon kak planetarnaya morfostruktura." *Geomorfologiya* 2 (1986): 3–16.
39. Naryshkin, G.D., A.A. Komaritsyn, A.V. Kavraiskii, V.A. Nesterov, A.B. Oparin, and B.S. Fridman. *Geomorfologicheskie aspekty vneshnei granitsy kontinental'nogo shel'fa Rossii v Arktike*. SPb.: GUNiO, 2005.
40. Lastochkin, A.N. *Sistemno-morfologicheskoe osnovanie nauk o Zemle (geotopologiya, strukturnaya geografiya i obshchaya teoriya geosistem)*. SPb.: Izd. NIIKHI, 2002.
41. *Nauchno-tehnicheskoe Rukovodstvo Komissii po granicam kontinentalnogo shelfa*. Pjataja sessija. Nju-Jork, 3-14 maja 1999 g.
42. Firsov, Yu. G. "Digital models of the ocean bottom relief and analysis of bathymetric profiles for Russian outer continental shelf boundary formation in Arctics." *Interjekspos Geo-Sibir S* (2011): 152–162.
43. Alexeev, S., A. Kostenich, K. Starov, G. Naryshkin, and B. Fridman. "Continental Foot of the Arctic Basin." *Arctic: Ecology and Economy* 1(5) (2012): 082–091.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Зинченко Анна Георгиевна —
 старший научный сотрудник
 Всероссийский научно-исследовательский
 институт Геологии и минеральных ресурсов
 Мирового океана (ВНИИОкеангеология)
 190121, Российская Федерация, Санкт-Петербург,
 Английский пр., 1
 e-mail: anna_zinchenko@mail.ru
Фирсов Юрий Георгиевич —
 кандидат технических наук, доцент
 ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала
 С. О. Макарова»
 198035, Российская Федерация, Санкт-Петербург,
 ул. Двинская, 5/7
 e-mail: gidrograph@mail.ru, kaf_gm@gumrf.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Zinchenko, Anna G. — Senior Researcher
 The All-Russia Scientific Research Institute
 of Geology and Mineral Resources of the World
 Ocean named after academician I. S. Gramberg»
 (VNIIOkeangeologia)
 1 Anglisky Av., St. Petersburg, 190121,
 Russian Federation
 e-mail: anna_zinchenko@mail.ru
Firsov, Yury G. —
 PhD, associate professor
 Admiral Makarov State University of Maritime
 and Inland Shipping
 5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg 198035,
 Russian Federation
 e-mail: gidrograph@mail.ru, kaf_gm@gumrf.ru

Статья поступила в редакцию 16 июля 2018 г.

Received: July 16, 2018.

TRAINING OF ENGINEERING PERSONNEL FOR DEVELOPMENT OF ARCTIC'S REGIONS WATERWAYS

V. G. Tsuprik¹, A. B. Afonin², P. A. Garibin²

¹ — Far Eastern Federal University, Vladivostok, Russian Federation

² — Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping,
St. Petersburg, Russian Federation

The principles and approaches of training engineering personnel for the development of waterways in the Arctic regions are continuously developing all over the world and unite training in natural and applied sciences with broad practice. International practice of education involves the allocation of the maritime transport industry from the general tasks of engineering surveys on the shelf, hydraulic engineering construction, ensuring the safety of maritime navigation. Training in most countries of the Arctic Council of other countries is part of the state programs for the innovative development of the Arctic zone, as well as international educational associations and projects. A detailed review of higher education institutions that provide training for the Arctic is given, current and prospective specialties in bachelor, master and advanced training programs are examined. Examples of national and international partnerships for the consolidation of resources in the field of personnel and scientific provision of sustainable social and economic development and development of the northern territories of the Russian Federation are considered. The aim of the work is to study the changes and adaptations of engineering education in the field of water transport for the Arctic regions in relation to modern conditions, consider the issues of organization and management of the educational process, the distribution of education levels of bachelor-master-engineer specialist, scientific activity, international cooperation and practice for students. Training of personnel for the Arctic regions is highly demanded, taking into account the development of the many-sided activities of many countries in the production of hydrocarbons on the shelves of the freezing seas, the construction of marine and river transport infrastructure, the extension of navigation on the routes of the Northern Sea Route, and industrial power supply of the territories.

Keywords: Arctic, training, Northern Sea Route, waterways, water transport infrastructure.

For citation:

Tsuprik, Vladimir G., Andrei B. Afonin, and Pavel A. Garibin. "Training of engineering personnel for development of Arctic's regions waterways." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 10.4 (2018): 752–761. DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-4-752-761.

УДК 378.14

ПОДГОТОВКА ИНЖЕНЕРНЫХ КАДРОВ ДЛЯ РАЗВИТИЯ ВОДНЫХ ПУТЕЙ ПРИ ОСВОЕНИИ АРКТИЧЕСКИХ РЕГИОНОВ

В. Г. Цуприк¹, А. Б. Афонин², П. А. Гарибин²

¹ — ФГАОУ ВО «Дальневосточный федеральный университет»

² — ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова»,
Санкт-Петербург, Российская Федерация

Принципы подготовки инженерных кадров для развития водных путей при освоении арктических регионов, непрерывно развивающиеся во всем мире, объединяют обучение естественным и прикладным наукам с широкой практикой. Международная практика образования предполагает выделение морской транспортной отрасли из общих задач инженерных изысканий на шельфе, гидротехнического строительства, обеспечения безопасности морского судоходства. Подготовка кадров в большинстве стран Арктического совета и других странах является частью государственных программ инновационного развития Арктической зоны, а также международных образовательных ассоциаций и проектов. Приводится подробный обзор высших учебных заведений, выполняющих подготовку кадров для Арктики, рассмотрены существующие и перспективные специальности подготовки по программам бакалавриата, магистратуры и высшей квалификации. Рассмотрены примеры национального и международного партнерства для кон-

солидации ресурсов в сфере кадрового и научного обеспечения устойчивого социально-экономического развития и освоения северных территорий Российской Федерации. Целью работы является исследование изменения и адаптации инженерного образования в области водного транспорта для арктических регионов применительно к современным условиям, в ней также рассматриваются вопросы организации и управления образовательным процессом, распределения уровней образования бакалавр – магистр – инженер – специалист, научной деятельности, международного сотрудничества и практики для студентов. Подготовка кадров для арктических регионов является весьма востребованной с учетом развития разносторонней деятельности многих стран по добыче углеводородов на шельфах замерзающих морей, строительству объектов морской и речной транспортной инфраструктуры, продлению навигации на трассах Северного морского пути, промышленному энергообеспечению территорий.

Ключевые слова: Арктика, подготовка кадров, Северный морской путь, водные пути, инфраструктура водного транспорта.

Для цитирования:

Цуприк В. Г. Подготовка инженерных кадров для развития водных путей при освоении арктических регионов / В. Г. Цуприк, А. Б. Афонин, П. А. Гарибин // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2018. — Т. 10. — № 4. — С. 752–761. DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-4-752-761.

Введение (Introduction)

Важнейшей составляющей деятельности человека по освоению российской Арктики всегда было плавание в морях Северного Ледовитого океана в летний навигационный период, поскольку оно играет ключевую роль в обеспечении доставки грузов в труднодоступные районы, прилегающие к северным морям («северный завоз»), включая острова, и функционировании торгово-экономических путей из устьев больших сибирских рек в Европу и на Дальний Восток. В настоящее время задача использования Северного морского пути (СМП) существенно усложнилась, поскольку предполагается его круглогодичное использование с увеличением грузооборота до 80 млн т в год [1].

Водные пути по крупным рекам, впадающим в северные моря, обеспечивают перевалку грузов для освоения «глубинных» территорий на материке, где недостаточно дорог, а жизнедеятельность обширнейших территорий поддерживается также доставкой грузов по зимникам. В связи с этим востребованность в инженерах, владеющих знаниями и искусством возведения долговечных портовых сооружений различного назначения на севере Европейской части России, в Сибири и на Дальнем Востоке, всегда была и на годы вперед останется очень высокой. Это обусловлено необходимостью динамичного развития в Арктике практически всех основных функциональных направлений деятельности людей, организаций, государственных ведомств, включая морские перевозки, морское промышленное рыболовство, освоение минеральных и энергетических ресурсов, морскую науку, военно-морскую деятельность.

Международная практика образования предполагает выделение морской транспортной отрасли из общих задач инженерных изысканий и гидротехнического строительства. В монографии [2] рассмотрены основные проблемы при формировании компетенций, предложен авторский взгляд на основные навыки, необходимые инженерам для освоения арктических территорий.

В Арктике особый интерес сосредоточен в области строительства портовых гидротехнических сооружений. В ближайшие годы будет построено несколько новых уникальных арктических портов, общая протяженность причального фронта которых может составить десятки километров. Для реализации таких масштабных проектов политехническое образование по курсам проектирования и строительства объектов инфраструктуры водного транспорта будет ключевой задачей для университетов и проектных организаций.

В Российской Федерации подготовка кадров для Арктического региона является одним из государственных приоритетов стратегии развития Арктической зоны [3]. Для этого необходимо решить широкий спектр задач, в том числе по обеспечению безопасности жизнедеятельности в регионе. Одним из направлений такой деятельности в государственной программе обозначена

проблема создания системы комплексной безопасности в Арктическом регионе, для решения которой необходимо развитие прибрежно-портовой инфраструктуры. Одним из основных путей освоения этого огромного региона в России является реконструкция портов СМП на арктическом побережье [4], [5] с проведением дноуглубления для приема современных судов, а также строительство новых портов с современными грузовыми терминалами, развитие аварийно-спасательных, навигационно-гидрографических служб, инфраструктуры объектов обеспечения безопасности мореплавания, объектов для бункеровки судов, приема сточных вод и твердых отходов и т. д. [6]. Кроме того, необходимо реализовать инновационную логистическую технологию создания круглогодичной системы взаимодействия СМП и внутренних водных путей Сибири и Крайнего Севера [7].

Методы и материалы (Methods and Materials)

В Российской империи специальных учебных заведений для подготовки инженеров для Арктики не существовало, эта квалификация приобреталась как сопутствующая, в условиях практической деятельности горных инженеров, морских военных инженеров, позднее — инженеров путей сообщения. Это были выпускники Горного института, основанного Екатериной II в 1773 г. и Института инженеров путей сообщения, открытого в Санкт-Петербурге в 1810 г. К концу XIX в. в результате интенсивного развития новых технологий студенты были уже не в состоянии освоить всю информацию одновременно по морскому судоходству, созданию новых технических конструкций и разработке современных технологий.

Вопрос о реорганизации технического образования в России разрешился с появлением нового типа высшего учебного заведения — политехнического института. Уже к началу XX в. в России сформировалась система подготовки инженерных кадров, в которую входили: традиционные технические вузы, политехнические институты, техникумы (средние-технические учебные заведения), союзы, общества и сообщества инженеров. В этот период были созданы или реорганизованы из других несколько вузов, в которых предусматривалась подготовка инженеров водных путей и портов. Прежде всего, это Институт инженеров путей сообщения Императора Александра I (1890 – 1919) — преемник Петербургского института инженеров путей сообщения (1864 – 1882), ранее Института корпуса инженеров путей сообщения (1810 – 1864) и Академии инженеров путей сообщения (1882 – 1890). В Петербургском институте инженеров путей сообщения на базе курса «Водяные сообщения» была образована кафедра «Гидротехнические сооружения, конструкции и гидравлика». Основателями и преподавателями этой кафедры были заложены основные направления отрасли речной гидротехники и созданы научные основы этой отрасли науки, широко известные не только в нашей стране, но и за рубежом. В 1930 г. Петербургский институт инженеров путей сообщения был преобразован в Ленинградский институт инженеров водного транспорта (ЛИИВТ), ставший впоследствии частью ныне существующего университета — Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова, который продолжает готовить инженеров-гидротехников для речного и морского строительства.

После начала освоения СМП и создания Главного управления СМП при Совете Министров СССР 25 апреля 1935 г. открылся Гидрографический институт, к преподаванию в котором были привлечены выдающиеся учёные и исследователи во главе с академиком О. Ю. Шмидтом. В 1945 г. Гидрографический институт был реорганизован в Ленинградское высшее арктическое морское училище с целью продолжения подготовки специалистов для освоения Арктики и Антарктики. В 1949 г. училищу присвоено имя адмирала С. О. Макарова. В 1953 г. Ленинградское высшее арктическое училище имени адмирала С. О. Макарова было объединено с Ленинградским высшим мореходным училищем. Объединённое учебное заведение стало называться Ленинградское высшее инженерное морское училище имени адмирала С. О. Макарова (ЛВИМУ) и впоследствии получило статус академии. В настоящее время правопреемником первого арктического учебного учреждения является Арктический факультет в составе ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова».

Также в конце XIX в. был создан Санкт-петербургский политехникум (1989), а в 1918 г. — Владивостокский высший политехникум, которые позднее, после ряда преобразований, стали Санкт-Петербургским политехническим институтом им. Петра Великого и Дальневосточным политехническим институтом. Развитие строительства речной и морской транспортной инфраструктуры как в довоенный период, так и сразу после войны требовало большого количества инженеров-гидротехников. В 1929 – 1930 гг. для подготовки инженеров-гидротехников были организованы факультет в Ленинградском политехническом институте и отделение в Дальневосточном политехническом институте. В 1943 г. в Московском инженерно-строительном институте из кафедры «Гидротехнические сооружения» (1931) была выделена кафедра «Водного хозяйства и морских портов». В марте 1951 г. в г. Новосибирске был открыт НИИВТ — Новосибирский институт инженеров водного транспорта.

Результаты исследований (Research Result)

Таким образом, в системе высшего образования после окончания Великой Отечественной войны сформировалась единообразная система подготовки *инженеров-гидротехников для строительства как речных водных путей, так и морских портов и инженеров-гидрографов для обеспечения безопасности навигации в акватории арктических морей*. Подготовка велась по типовым учебным планам, «привязанным» к региональным условиям. Единство методики подготовки обеспечивалось использованием одних и тех же учебников по основным профильным дисциплинам, написанных ведущими профессорами головных институтов. Студенты закрепляли теоретические знания на учебных практиках по геодезии, геологии, гидрографии, навигации, а на старших курсах проходили практику на строящихся по всей стране объектах и на судах. Молодое поколение будущих инженеров получало рабочие профессии на практике и в строительных отрядах, непосредственно участвуя в строительстве причалов, оградительных сооружений, пирсов, спусковых стапелей и сухих доков судоремонтных заводов, мостов и тоннелей. Такой подход к подготовке квалифицированных кадров в течение 25 – 30 послевоенных лет позволил создать мощную инфраструктуру транспортных путей как на реках, так и на морях. Были построены и оборудованы порты на трассе СМП, ряд северных дальневосточных портов, паромные переправы, устьевые порты на великих сибирских реках: Оби, Енисее и Лене.

Новый импульс в освоении и развитии российского Арктического региона делает крайне актуальной подготовку кадров для реализации всех проектов в самое короткое время. По данным мониторинга ситуации, которым занимается Министерство образования и науки Российской Федерации, потребность в кадрах по всем специальностям составляет 25 тыс. чел. ежегодно [8]. В последние годы, в соответствии с планами Правительства РФ по освоению Арктической зоны [9], [10], будет увеличена подготовка квалифицированных кадров по техническим специальностям.

В 2007 г. был создан Северо-Восточный Федеральный университет имени М. К. Аммосова в г. Якутске, в 2009 г. — Северный (Арктический) федеральный университет имени М. В. Ломоносова в г. Архангельске. Миссиями этих университетов является создание инновационной научной и кадровой базы для интеллектуального освоения Севера России и Арктики. Для усиления российского научного присутствия в Арктике и подготовки специалистов для работы в высоких широтах создан инновационный образовательный проект «Арктический плавучий университет», который осуществляется при поддержке Русского географического общества с 2012 г. В северных федеральных университетах ведется подготовка специалистов для освоения арктической зоны по широкому спектру направлений и специальностей, в том числе — по направлению «Строительство» реализуются программы по *гидротехническому, промышленному и гражданскому строительству, строительству автомобильных дорог и аэродромов, новых строительных материалов и технологий для Севера и т. д.*

В 2016 г. был образован Национальный арктический научно-образовательный консорциум [11], который создали 14 научных и образовательных организаций, включая федеральные университеты. Целью деятельности консорциума является консолидация ресурсов в сфере кадрового

и научного обеспечения устойчивого социально-экономического развития и освоения северных и арктических территорий Российской Федерации. Он представляет собой добровольное объединение вузов, научных организаций, предприятий, реализующих в своей деятельности программы подготовки кадров для Арктической зоны Российской Федерации, ведущих исследования, хозяйственно-экономическую деятельность на арктических территориях и по арктической тематике.

Подготовку специалистов по направлению «Гидротехническое строительство» (бакалавриат — четыре года) и «Гидротехническое строительство сооружений повышенной ответственности» (специалитет — шесть лет), в соответствии с объявленными на сайтах России наборами, ведут следующие российские университеты:

- Волжский государственный университет водного транспорта (бакалавриат);
- Государственный университет морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова с филиалом в г. Москве (две программы);
- Дальневосточный федеральный университет (специалитет, бакалавриат, магистратура, аспирантура);
- Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (специалитет);
- Нижегородский государственный архитектурно-строительный университет (две программы);
- Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет (бакалавриат);
- Российский государственный аграрный университет — МСХА имени К. А. Тимирязева (бакалавриат);
- Самарский государственный технический университет (бакалавриат);
- Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого;
- Сибирский государственный университет водного транспорта (бакалавриат).

Подготовку специалистов по направлению «Управление водным транспортом и гидрографическое обеспечение судоходства» (бакалавриат — четыре года), профили «Гидрографическое обеспечение мореплавания и морских инженерных изысканий», «Гидрографическое и гидрометеорологическое обеспечение мореплавания» и по магистерской программе «Гидрографическое обеспечение морского и речного транспорта» выполняет Арктический факультет Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова.

В большинстве этих университетов также ведется подготовка магистров по направлениям, связанным с гидротехническим строительством портов и сооружений внутренних водных путей.

В Дальневосточном федеральном университете, кроме того, реализуется программа для подготовки магистров на английском языке Offshore and coastal engineering (срок обучения — 2 года). В основном сюда поступают выпускники бакалавриата по профилям подготовки «Гидротехнические сооружения», «Промышленное и гражданское строительство», а также (для получения второй квалификации) выпускники как российских, так и зарубежных вузов, получивших подготовку по направлениям «Менеджмент», «Экономика промышленности», «Нефтегазовое дело» и др. Кроме того, в этом университете на базе кафедры «Гидротехника, теория зданий и сооружений» ежегодно в середине учебного года в течение двух недель реализуется подготовка магистров по дисциплинам модуля Ice Mechanics. Этот модуль включает как теоретический курс, так и практические занятия по исследованиям морского льда на прилегающей к университету морской акватории, покрываемой льдом в зимний период на 2,5 – 3,5 мес.

В 2001 г. состоялось официальное открытие Университета Арктики в г. Рованиеми (Лапландия, Финляндия) [13], действительными членами которого являются 170 университетов и научно-исследовательских учреждений из стран Арктического региона с приполярными территориями: Дания, Исландия (о. Гренландия), Канада, Норвегия, Россия, США (штат Аляска), Финляндия, Швеция. Ассоциированными членами Университета Арктики являются университеты и учреждения из стран, находящихся за пределами Арктического круга: Бельгия, Великобритания, Китай, Корея, Монголия, Франция, Япония. Таким образом, можно констатировать, что создана международная сеть уни-

верситетов, колледжей, научно-исследовательских институтов, а также организаций, работающих в сфере высшего образования и исследовательской деятельности на Полярном Севере.

Российскими членами Университета Арктики являются 36 организаций, среди которых университеты, научно-исследовательские учреждения и институты. Программы арктической направленности реализуют 30 образовательных организаций, шесть из которых находятся в Арктической зоне Российской Федерации, при этом 17 вузов имеют в рамках программ подготовки конкретные компетенции арктического характера.

Подготовка кадров в большинстве стран Арктического совета является частью *государственных программ инновационного развития Арктической зоны*, а также международных образовательных Ассоциаций и проектов. Одним из примеров такого рода ассоциации является Арктическое научное партнерство (ASP) нескольких университетов: Дании (Орхусский университет), Исландии (университет Гренландии) и Канады (университет Манитобы), с участием университетского исследовательского Института Альфреда Вегенера (Германия) [14]. Основная цель команды *ASP Education* заключается в содействии арктическому образованию в Гренландии, Дании и Канаде (как дисциплинарному, так и междисциплинарному), создании образовательных программ в области арктических наук в каждом из учреждений-членов посредством скоординированного подхода к разработке учебного плана, созданию учебных ресурсов и проектировании полевых школ. Это будет сделано на уровне бакалавриата и магистратуры. Другая цель заключается в разработке необходимых механизмов для поощрения и облегчения обмена студентами между учебными заведениями, что позволит студентам принимать участие в научных исследованиях и в дальнейшем обучении. Кроме того, работа ASP направлена на создание возможностей для обмена студентами и профессорско-преподавательским составом, в том числе на обеспечение материально-технических обменов, создание механизмов для повышения осведомленности о возможностях обучения, исследований и трудоустройства студентов. Образовательные программы университетов-партнеров ASP направлены на подготовку кадров как в области естественно-научного образования, так и в области наук, обеспечивающих техническое, в частности, строительное образование, это — геология, океанология, гидрология, метеорология, охрана окружающей среды и т. д.

Наиболее освоенной береговой линией в транспортном отношении является российское и норвежское побережья морей Северного Ледовитого океана и ряда их островов. Еще более развиты порты Швеции и Финляндии, находящиеся в акватории замерзающего Ботнического и части Финского заливов. Именно в этих странах сегодня имеются государственные образовательные учреждения для подготовки инженеров-строителей морских и речных портовых и берегоукрепительных сооружений. Учитывая специфические условия строительства и эксплуатации как портовых комплексов, так и припортовой энергетической, транспортной, промышленной и жилой инфраструктуры, специалисты, направляющиеся в такие регионы, должны иметь подготовку по расширенному спектру предметов и базу знаний для возможности перепрофилирования.

Международное сотрудничество европейских университетов в области подготовки кадров в области морской техники, строительства и эксплуатации морских сооружений в арктических территориях имеет многолетний опыт и в последние годы активно развивается. Существуют совместные программы, реализуемые университетами Норвегии, Швеции, Дании, Финляндии, Нидерландов. Здесь подготовка инженеров-гидротехников ведется в рамках направления «Морские технологии».

В Норвегии подготовка специалистов в области морских технологий и судостроения начинается в старших школах (*videregaende skole / upper secondary school*, среднее полное образование), профессиональных колледжах (*fagskole / vocational school*, среднее профессиональное образование), высших школах (*hoyskole / university college*) и университетах (высшее образование). В число вузов, осуществляющих подготовку судостроительных кадров, входят:

– Норвежский научно-технический университет, Норвежский Арктический университет, г. Тромсё;

- Университет в г. Ставангере;
- Столичный университет в г. Осло (OsloMet-storbyuniversitetet / Oslo Metropolitan University), до января 2018 г. — Высшая школа Осло и Акерсхуса;
- Высшие школы Вестланда, Юго-Восточной Норвегии и Эстфолда.

Норвежский научно-технический университет (ННТУ, Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet / Norwegian University of Science and Technology), г. Трондхейм, Центральная Норвегия, является ведущим вузом страны, осуществляющим подготовку специалистов в сфере морских технологий и судостроения [15]. Студенты, поступившие в ННТУ по программе «Морская техника» (магистратура, два года или пять лет), проходят подготовку по одной из восьми специальностей, включая следующие:

- конструирование морских сооружений;
- морская гидродинамика;
- морские ресурсы и аквакультура;
- проектирование судовых и портовых систем;
- организация охраны труда и эксплуатационного обеспечения;
- техника морских подводных сооружений — только на пятилетней магистратуре, где обучение по узкому профилю начинается с третьего курса, пятый курс посвящен подготовке дипломной работы.

Норвежский Арктический университет (Universitetet i Tromsø — Norges arktiske universitet/ University of Tromsø — The Arctic University of Norway), г. Тромсё, готовит специалистов по следующим программам:

- инженерный дизайн — магистратура (два года), обучение осуществляется на английском языке в филиале университета в г. Нарвик, Северная Норвегия;
- машиностроение — бакалавриат (три года), северо-норвежские города Алта, Му-и-Рана, Нарвик; специализации: техника конструирования, техника производства, управление технологическими процессами; возможно получение образования дистанционно.

Университет в г. Ставангер (UNIS — Universitetet i Stavanger / University of Stavanger), на. о. Шпицберген, является самым северным учебным заведением в мире. Этот университет (университетский центр) является результатом кооперации университетов Осло, Бергена, Тромсё и NTNU [16]. Философией университета является освоение Арктики общими усилиями (международное). Здесь подготовка ведется на норвежском языке. Студенты-иностранцы проходят годичную языковую подготовку и имеют возможность получить специальность инженера-строителя по направлениям:

- морские инженерные технологии в условиях арктических льдов;
 - технологии строительства в условиях вечной мерзлоты,
- а также ряду ряду других, связанных с освоением Арктической зоны.

В целях углубленной практической подготовки квалифицированных кадров и гарантированного обеспечения работой выпускников на территории вуза открыто множество бизнес-инкубаторов и работает Технический парк. Кроме того, в университете Ставангера на постоянной основе проводится обучение на английском языке по курсу Arctic Offshore Engineering в виде модуля в объеме десяти кредитов (зачетных единиц) со специальным (арктическим) набором дисциплин, таких как физика и механика льда, управление ледовой обстановкой, проектирование гидротехнических сооружений в условиях воздействия дрейфующего льда и т. д. Этот курс является модулем программы подготовки в университетах Норвегии, Дании, Финляндии, Швеции и др. направление Arctic Technology (AT). В результате обучения студенты развивают навыки проектирования морских сооружений в Арктике с учетом влияния фактора льда и сурового климата.

Высшая школа Вестланда (Høgskulen på Vestlandet / Western Norway University of Applied Sciences) предлагает обучение по двум направлениям: «Морские технологии» и «Общее машиностроение». Программа «Морские технологии» (бакалавриат, три года, филиал в г. Бергене) предусматривает освоение навыков конструирования, строительства, эксплуатации и техобслуживания судов и морских сооружений, в частности, акваферм.

Совместно с четырьмя вузами, находящимися в Дании, Финляндии и Швеции, ННТУ реализуется англоязычная программа «Морские технологии» (магистратура — два года). Первый год студенты обучаются в Норвегии, второй — в одной из указанных стран. Подготовка осуществляется по пяти направлениям: проектирование морских сооружений (занятия проходят в ННТУ в г. Трондхейм), проектирование пассажирских судов (Университет Аалта, Финляндия), конструкция судов и дизайн (Технический университет им. Чалмерса, Швеция), морские операции (Датский технический университет), проектирование маломерных судов (Королевский технологический институт, Швеция). По окончании обучения студентам выдаются два диплома.

Совместно с Университетом Аалта и Датским техническим университетом ННТУ реализуется программа «Машиностроение в холодных климатических условиях» (магистратура — два года, г. Трондхейм). Студенты проходят подготовку в двух из трех вузов (по году в каждом, по окончании обучения выдаются два диплома) по трем специальностям: «Геоинженерия в Арктике», «Картографирование и наблюдение за арктическими пространствами», «Арктические суда и морские сооружения». Обучение по последнему направлению, организуемое ННТУ совместно с Университетом Аалта, предполагает освоение навыков проектирования судов и морских сооружений, приспособленных к условиям Арктики. Предусмотрена возможность проведения «полевых работ» на архипелаге Шпицберген.

Общим для вузов Норвегии является то, что они не проводят программы бакалавриата на английском. Данная возможность доступна только для некоторых магистерских программ, но при каждом вузе открыты курсы норвежского языка, предоставляемые иностранным студентам бесплатно.

Обсуждение результатов (Discussion of Results)

В подготовке кадров для гидротехнического строительства в целях освоения Арктического региона наиболее заинтересованы страны, имеющие береговые линии в пределах морей Северного Ледовитого океана и других заполярных морей. Это, прежде всего, восемь стран, подписавших в 1996 г. в г. Оттаве Декларацию о создании Арктического совета: Дания, США, Россия, Канада, Норвегия, Исландия, Швеция и Финляндия [12]. Главной целью Арктического совета является содействие сотрудничеству в области охраны окружающей среды и обеспечение устойчивого развития приполярных районов. Развитие Арктической зоны делает особенно актуальным подготовку специалистов со средним и высшим профессиональным образованием с учетом специфических условий жизнедеятельности в Арктике.

Практически все российские университеты осуществляют сотрудничество с университетами Норвегии, Финляндии, Дании, Канады или Китая по совместной реализации магистерских программ по сетевым технологиям. Сегодня получают распространение модульные программы профессиональной подготовки, что облегчит возможность выстраивания студентами и учащимися индивидуальных образовательных траекторий.

Заключение (Conclusion)

Подготовка инженеров-гидротехников и гидрографов в настоящее время является весьма востребованной с учетом развития разносторонней деятельности многих стран по освоению арктических регионов планеты, включая добычу углеводородов на шельфах замерзающих морей, строительство объектов морской и речной транспортной инфраструктуры, продление навигации на трассах Северного Ледовитого океана, энергообеспечение промышленного и хозяйственного освоения северных территорий. Профессиональное образование для Арктики приобрело черты гибкой, открытой и развивающейся системы, способной оказать значительное содействие социально-экономическому развитию регионов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Указ Президента Российской Федерации от 07.05.2018 № 204 «О национальных целях и стратегических задачах развития Российской Федерации на период до 2024 года».

2. McCabe B. Shaking the Foundations of Geo-Engineering Education / B. McCabe, M. Pantazidou, D. Phillips. — London: CRC Press, 2012. — 330 p.
3. Стратегия развития Арктической зоны Российской Федерации и обеспечения национальной безопасности на период до 2020 года. [Электронный ресурс]. — Режим доступа: https://minec.gov-murman.ru/upload/iblock/b36/strategy_azrf.pdf (дата обращения: 01.07.2018).
4. Северный морской путь: проблемы и надежды Арктики. [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <http://pro-arctic.ru/24/03/2017/resources/25787/print/> (дата обращения: 01.07.2018).
5. Красильникова О. А. Особенности и перспективы развития морских портов Арктического бассейна / О. А. Красильникова, Н. С. Ломакина // Молодой ученый. — 2014. — № 7. — С. 136–139.
6. Российская Арктика в 2016 году. Развитие портов Северного морского пути. [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <http://rareearth.ru/ru/pub/20170109/02824.html> (дата обращения: 01.07.2018).
7. Российская Арктика в 2016 году. Развитие Мурманского транспортного узла. [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <http://rareearth.ru/ru/pub/20161226/02799.html> (дата обращения: 01.07.2018).
8. Минобрнауки РФ организует подготовку профессиональных кадров для освоения Арктики. [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://narfu.ru/life/news/university/229240/> (дата обращения: 01.07.2018).
9. Панов П. Арктику ждет масштабное строительство дорог и портов. [Электронный ресурс] / П. Панов. — Режим доступа: <https://iz.ru/news/689906> (дата обращения: 01.07.2018).
10. План мероприятий по реализации Стратегии развития Арктической зоны Российской Федерации и обеспечения национальной безопасности на период до 2020 года. [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <http://docs.cntd.ru/document/456048637> (дата обращения: 01.07.2018).
11. Национальный арктический научно-образовательный консорциум. [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <http://arctic-union.ru/> (дата обращения: 01.07.2018).
12. Декларация об учреждении Арктического Совета. [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <http://docs.cntd.ru/document/901880137> (дата обращения: 01.07.2018).
13. Университет Арктики. [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://ru.uarctic.org/universitet-arktiki> (дата обращения: 01.07.2018).
14. Arctic Research Centre. [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <http://arctic.au.dk/> (дата обращения: 01.07.2018).
15. Norwegian University of Science and Technology. [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://www.ntnu.edu/> (дата обращения: 01.07.2018).
16. Университет в Ставангере. [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <http://www.norge.ru/stavangeruni> (дата обращения: 01.07.2018).

REFERENCES

1. Ukaz Prezidenta Rossiiskoi Federatsii ot 07.05.2018 № 204 «O natsional'nykh tselyakh i strategicheskikh zadachakh razvitiya Rossiiskoi Federatsii na period do 2024 goda».
2. McCabe, Bryan, Marina Pantazidou, and Declan Phillips. *Shaking the Foundations of Geo-Engineering Education*. CRC Press, 2012.
3. Strategiya razvitiya Arkticheskoi zony Rossiiskoi Federatsii i obespecheniya natsional'noi bezopasnosti na period do 2020 goda. Web. 1 July 2018 <https://minec.gov-murman.ru/upload/iblock/b36/strategy_azrf.pdf>.
4. Severnyi morskoi put': problemy i nadezhdy Arktiki. Web. 1 July 2018 <<http://pro-arctic.ru/24/03/2017/resources/25787/print/>>.
5. Krasil'nikova, O.A., and N.S. Lomakina. "Osobennosti i perspektivy razvitiya morskikh portov Arkticheskogo basseina." *Molodoi uchenyi* 7 (2014): 136–139.
6. Rossiiskaya Arktika v 2016 godu. Razvitie portov Severnogo morskogo puti. Web. 1 July 2018 <<http://rareearth.ru/ru/pub/20170109/02824.html>>.
7. Rossiiskaya Arktika v 2016 godu. Razvitie Murmanskogo transportnogo uzla. Web. 1 July 2018 <<http://rareearth.ru/ru/pub/20161226/02799.html>>.
8. Minobrnauki RF organizuet podgotovku professional'nykh kadrov dlya osvoeniya Arktiki. Web. 1 July 2018 <<https://narfu.ru/life/news/university/229240/>>.
9. Panov, P. Arktiku zhdet masshtabnoe stroitel'stvo dorog i portov. Web. 1 July 2018 <<https://iz.ru/news/689906>>.

10. Plan meropriyatii po realizatsii Strategii razvitiya Arkticheskoi zony Rossiiskoi Federatsii i obespecheniya natsional'noi bezopasnosti na period do 2020 goda. Web. 1 July 2018 <<http://docs.cntd.ru/document/456048637>>.
11. Natsional'nyi arkticheskii nauchno-obrazovatel'nyi konsortsium. Web. 1 July 2018 <<http://arctic-union.ru/>>.
12. Декларация об учреждении Арктического Совета. Web. 1 July 2018 <<http://docs.cntd.ru/document/901880137>>.
13. Universitet Arktiki. Web. 1 July 2018 <<https://ru.uarctic.org/universitet-arktiki>>.
14. Arctic Research Centre. Web. 1 July 2018 <<http://arctic.au.dk/>>.
15. Norwegian University of Science and Technology. Web. 1 July 2018 <<https://www.ntnu.edu/>>.
16. Universitet v Stavangere. Web. 1 July 2018 <<http://www.norge.ru/stavangeruni>>.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Цуприк Владимир Григорьевич —
кандидат технических наук, доцент
Дальневосточный Федеральный университет (ДВФУ)
690091, Российская Федерация, Владивосток,
ул. Суханова, 8
e-mail: tsuprik.vg@dvfu.ru

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

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

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Tsuprik, Vladimir G. —
PhD, associate professor
Far Eastern Federal University
8 Sukhanova Str., Vladivostok, 690091,
Russian Federation
e-mail: tsuprik.vg@dvfu.ru

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

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

*Статья поступила в редакцию 16 июля 2018 г.
Received: July 16, 2018.*

СУДОСТРОЕНИЕ И СУДОРЕМОНТ

DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-4-762-769

DETERMINATION OF ICE LOADS IN DESIGNING SELF-ELEVATING DRILLING UNITS

I. L. Blagovidova

CDB «Corall» JSC, Sevastopol, Russian Federation

Taking into account challenges associated with research and development of offshore oil/gas fields in Arctic seas of the Russian Federation, a possibility of using Self-Elevating Drilling Units (SEU's) at those fields is considered. SEU operating experience indicates that in frozen water areas, SEU can occur in abnormal situations related to abrupt and fast ice formation. Occurrence of such situations is actually confirmed by the incident of Project 1540 SEU operated in the Sea of Azov. In case of operating in Arctic seas, it is generally desirable to prolong SEU operation period by 1.5 to 2 months due to a possible operation in brash ice or in thin sheet ice at earlier stages of ice formation. To meet that challenge, CDB Corall JSC has performed a number of calculations of ice loads acted on trussed legs of three-legged SEU, and model tests have been carried out at Krylov State Research Centre as well. Theoretical estimations have been fulfilled using semi-empirical procedures generally applied to estimate resistance of broken ice to a moving vessel, and using methods of estimating ice load based on consideration of broken ice as a loose medium. Unfortunately, the difference between the calculated results reached as much as 200%. Therefore, model tests were carried out to obtain more accurate values of ice loads. Maximal calculated values are close to model tests results. The results of theoretical calculations and model tests indicated the real possibility to provide strength of SEU's trussed legs in brash ice or thin sheet ice with thickness of about 0.35 m.

Keywords: Self-Elevating Drilling Unit, leg, ice load, broken ice, sheet ice, model test.

For citation:

Blagovidova, Irina L. "Determination of ice loads in designing self-elevating drilling units." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 10.4 (2018): 762–769. DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-4-762-769.

УДК 622.242.4; 624.042.13

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЛЕДОВЫХ НАГРУЗОК ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ САМОПОДЪЕМНЫХ ПЛАВУЧИХ БУРОВЫХ УСТАНОВОК

И. Л. Благовидова

АО «ЦКБ «Коралл», Севастополь, Российская Федерация

Учитывая проблемы разведки и эксплуатации морских нефтегазовых месторождений в арктических морях России, рассмотрена возможность использования в них самоподъемных плавучих буровых установок (СПБУ). Опыт эксплуатации СПБУ показывает, что в замерзающих акваториях они могут попасть в нештатные ситуации, связанные с ранним и быстрым ледообразованием. Реальность таких ситуаций подтверждается, например, ситуацией с СПБУ пр. 1540 в Азовском море. При работе в Арктических морях вообще желательно продлить время эксплуатации СПБУ на 1,5 – 2 мес. за счет возможности работы в мелкобитом или тонком ровном льду в начальных стадиях ледообразования. Для возможности решения данной проблемы в АО «ЦКБ «Коралл» была проведена серия расчетов возможных ледовых нагрузок на ферменные опорные колонны трехопорной СПБУ, а также выполнены модельные испытания в ледовом бассейне ФГУП «Крыловский государственный научный центр». Теоретические расчеты были выполнены по полуэмпирическим методикам, применяемым обычно для оценки сопротивления битого льда движению судна, а также по методам оценки ледовой нагрузки, основанным на представлении битого льда как сыпучей среды. К сожалению, разница в расчетах составила до 200 %, поэтому для более точного определения ледовых нагрузок были проведены модельные испытания. Максимальные значения расчетных

величин близки к результатам модельных испытаний. Результаты теоретических расчетов и модельных испытаний показали реальную возможность обеспечения прочности ферменных опорных колонн СПБУ в мелкобитом или тонком ровном льду толщиной ~ 0,35 м.

Ключевые слова: самоподъемная плавучая буровая установка, опорная колонна, ледовая нагрузка, битый лед, ровный лед, модельное испытание.

Для цитирования:

Благовидова И. Л. Определение ледовых нагрузок при проектировании самоподъемных плавучих буровых установок / И. Л. Благовидова // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2018. — Т. 10. — № 4. — С. 762–769. DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-4-762-769.

Введение (Introduction)

Для разведки и разработки нефтегазовых сооружений на малых глубинах широко применяются самоподъемные плавучие буровые установки (СПБУ). СПБУ, как правило, не предусматриваются для работы в акваториях, покрытых льдом. Проведенный анализ гидрометеоусловий арктических морей России показал, что в этих акваториях существует устойчивый безледовый период продолжительностью в среднем 2,5 – 3 мес. Таким образом, СПБУ, специально спроектированные для проведения ускоренных буровых работ, могут успешно эксплуатироваться на арктическом шельфе в безледовый период. Тем не менее необходимо учитывать, что СПБУ могут попасть в непредвиденные обстоятельства, и эксплуатационникам надо знать, какие ледовые условия СПБУ может выдержать при окончании буровых работ и уходе с точки бурения в период начала ледообразований. Поэтому для предотвращения аварийных ситуаций, связанных с повреждением опорных колонн льдом, при проектировании СПБУ необходимо оценить ледовые нагрузки от полей ровного и битого льда. Реальная ситуация с СПБУ пр. 1540 в декабре 2002 г. в Азовском море показана на рис. 1 и 2.



Рис. 1. Реальная ледовая обстановка в декабре 2002 г. Азовское море: СПБУ пр. 1540 в ледовом плену



Рис. 2. Ледовые образования на ферменных опорах СПБУ пр. 1540

СПБУ задержалась на точке бурения до декабря 2002 г. и попала в ледовые условия после быстрого замерзания Азовского моря. После потепления она благополучно была отбуксирована на зимний отстой.

Методы и материалы (Methods and Materials)

Нагрузки от битого льда на одну опору. Существует ряд нормативных документов (как российских, так и международных), регламентирующих вопросы определения нагрузок на плавучие и стационарные морские нефтегазовые сооружения, в том числе и на СПБУ:

– СП 38.13330.2012. Нагрузки и воздействия на гидротехнические сооружения (волновые, ледовые и от судов) [1];

– «Правила классификации, постройки, оборудования плавучих буровых установок и морских стационарных платформ» Российского морского регистра судоходства [2];

– ISO 19906 Petroleum and natural gas industries — Arctic offshore structures [3].

Вопросы проектирования СПБУ изложены в документах ISO [4], [5], однако в них отсутствуют рекомендации по учету воздействия ледовых образований на ферменные конструкции и в перечисленных правилах не рассматривается взаимодействие инженерных сооружений с битым льдом. Отсутствие информации в нормативных документах связано с тем, что взаимодействие с битым льдом не является определяющим для сооружений, которые в большинстве своем должны быть способны противостоять воздействию обширных ледяных полей.

Более важную роль нагрузка от битого льда играет в судоходстве, где соотношение между тягой движительной установки конкретного судна и испытываемого им сопротивлением движению со стороны битых льдов практически определяет возможность его плавания в ледовых условиях. Изучением взаимодействия ледоколов и судов ледового плавания с битым льдом занимались Ю. Н. Алексеев [6], А. В. Бронников [7], В. И. Каштелян [8], Л. М. Ногид [9], А. Я. Рывлин [10], К. Е. Сазонов [11] и многие другие отечественные и зарубежные специалисты. В монографии [8] приведены некоторые полуэмпирические методики, позволяющие оценить сопротивление битого льда движению судна. Существует также ряд методов оценки ледовой нагрузки, основанных на представлении битого льда как сыпучей среды [11].

В АО ЦКБ «Коралл» была проведена серия расчетов ледовой нагрузки на ферменную опору СПБУ по различным методикам. Анализ полученных результатов показывает, как трудно сделать обоснованный вывод о применимости какой-либо из методик в качестве расчетной для определения нагрузки от битого льда на опорную колонну СПБУ, поскольку разница в значениях, полученных по различным методикам, составляет до 200 %, причем определить причину такого расхождения в результатах весьма проблематично. Для более точного определения ледовых нагрузок от битого льда необходимо проведение модельных испытаний объекта в ледовом опытовом бассейне. Испытания были проведены по техническому заданию и программе испытаний АО ЦКБ «Коралл» во ФГУП «Крыловский государственный научный центр» [12]. На рис. 3, *а* показан вид модели корпуса СПБУ, на рис. 3, *б* — вид модели опоры.

а)

б)



Рис. 3. Вид моделей корпуса (а) и опоры (б) СПБУ

В процессе модельных испытаний было исследовано взаимодействие ферменной трехгранной опоры СПБУ с мелкобитым льдом различной толщины и сплоченности, с различной скоростью дрейфа. Модельные испытания показали, что при взаимодействии опорной колонны СПБУ с битым льдом преимущественно происходило раздвигание обломков ледового поля моделью. На разных скоростях движения при сплоченности 90 % периодически происходило частичное скопление обломков льда перед ней и буксировка на небольшие расстояния с последующим сдвигом льда в сторону от опоры. В периоды скопления обломков перед моделью наблюдалось прорезание льда рейками опорной колонны с образованием небольшого количества ледяной крошки (рис. 4). Ледовых нагромождений во время испытаний не наблюдалось.



Рис. 4. Взаимодействие опорной колонны СПБУ с битым льдом сплоченностью 90 %

В процессе испытаний были получены максимальные значения продольной горизонтальной составляющей нагрузки от ледовых воздействий на опору и корпус СПБУ:

– опора СПБУ

битый лед $h = 0,35$ м 0,42 МН для $S = 90$ % и скорости 0,5 м/с;

битый лед $h = 0,90$ м 1,08 МН для $S = 90$ % и скорости 0,5 м/с;

– корпус СПБУ

битый лед $h = 0,35$ м 1,63 МН для $S = 90$ % и скорости 0,7 м/с;

битый лед $h = 0,90$ м 3,80 МН для $S = 90$ % и скорости 0,7 м/с.

Было проведено сравнение результатов, полученных на основе использования теоретических методик, с результатами модельных испытаний (табл. 1). Нагрузка определялась для битого льда толщиной 0,35 м и сплоченностью 90 %. Диапазон теоретических значений соответствует результатам, полученным на основе результатов использования различных методик, диапазон результатов модельных испытаний соответствует различным скоростям дрейфа льда. В большинстве теоретических методик влияние на нагрузку скорости дрейфа поля битого льда не учитывается.

Таблица 1

Нагрузка от битого льда на опору СПБУ

Направление нагрузки	Ледовая нагрузка, кН	
	теоретические расчеты	модельные испытания
на грань опоры	166 – 315	330 – 420
на угол опоры	144 – 370	270 – 360

Как видно из табл. 1, диапазон значений ледовой нагрузки, полученных с использованием теоретических методик, весьма широк, хотя максимальные значения близки к результатам, полученным на модельных испытаниях. При этом следует учитывать, что, с одной стороны, анали-

тические методы предназначены для определения нагрузок от битого льда на ледоколы и суда ледового плавания, и вопрос их применимости для ферменных конструкций остается открытым. С другой стороны, в модельных испытаниях рассмотрен достаточно специфический сценарий взаимодействия опоры СПБУ с битым льдом, когда поле дрейфующего битого льда достигает района эксплуатации установки. В реальных условиях, когда начнется процесс ледообразования в районе эксплуатации СПБУ, сценарий взаимодействия опор установки со льдом будет совершенно иным — замерзание воды произойдет вокруг опорных колонн, и ферменная конструкция вмержнет в лед. Однако определение нагрузок, возникающих в данном случае, является достаточно сложной и неоднозначной задачей, поэтому на начальных стадиях проектирования оценку ледовых нагрузок можно произвести упомянутыми методами.

Следует также отметить, что при изучении взаимодействия молодого льда (как битого, так и сплошного поля) с инженерными сооружениями сложной задачей является определение физических характеристик ледовых образований: плотности, прочности на сжатие и на изгиб, упругости и т. д. Это связано с тем, что физические параметры молодого льда зависят от многих факторов (солености морской воды, количества пор во льду и концентрации рассола в порах, количественного соотношения между различными формами начальных льдов). Таким образом, расчетные методики, в большинстве своем рассчитанные на битый лед в канале за ледоколом, нужно применять с большой осторожностью.

Кроме того, аналитические выражения для определения нагрузки от битого льда являются полуэмпирическими или основываются на представлении битого льда как сыпучей среды. В большей части методик не учитываются многие особенности физического процесса взаимодействия битого льда с преградой, что обуславливает недостаточную точность расчетов по этим методикам. При использовании полуэмпирических формул следует учитывать, что на значения коэффициентов влияет точность проведения эксперимента. В формулах, основанных на механике сыпучих сред, фигурируют физические параметры (например, коэффициент сцепления и угол внутреннего трения), не являющиеся механическими константами сыпучей среды, а зависящие от условий и форм ее деформации. Выбор значений этих параметров оказывает непосредственное влияние на результат расчета и связан с определенными трудностями.

Нагрузки от ровного льда на одну опору. Как отмечалось ранее, в нормативных документах отсутствуют рекомендации по расчету ледовых нагрузок на ферменные конструкции. Для определения характера взаимодействия и уровня ледовых нагрузок при воздействии поля ровного льда на ферменную опору СПБУ по техническому заданию и по программе АО ЦКБ «Коралл» были проведены модельные испытания в ледовом бассейне «Крыловского государственного научного центра» (рис. 5).



Рис. 5. Взаимодействие опоры СПБУ с ровным льдом (модельные испытания)

Одним из факторов, определяющих происходящие при взаимодействии сооружения со льдом процессы, является геометрическая форма преграды. Испытываемая в ледовом опытовом бассейне в поле ровного льда опора СПБУ представляет собой ферменную конструкцию. Ледорезной частью опоры служит система вертикальных трубчатых элементов, поэтому лед разрушается преимущественно смятием с образованием небольшого количества ледяной крошки. Характерный размер образующихся обломков ледяной крошки составляет примерно 1 – 1,5 м для натуральных условий. Ледовых нагромождений в процессе испытаний не возникало.

Максимальное значение нагрузки на опору от ровного льда толщиной 0,35 м составило 2,6 МН при скорости дрейфа 0,7 м/с. При скорости дрейфа 0,3 м/с нагрузка составила 1,9 МН. В табл. 2 приведены данные о волновых нагрузках на данную опорную конструкцию СПБУ, вычисленные по теоретическим методикам (в том числе и по правилам РМРС), и результаты, полученные в результате модельных испытаний [9].

Таблица 2

Волновая нагрузка на СПБУ

Высота волны 3 % обеспеченности, м	Волновая нагрузка, МН	
	теоретические расчеты	модельные испытания
7,0	1,66	1,52
15,3	5,71	5,14

Величины волновых нагрузок, на которые обычно рассчитываются СПБУ, превышают значения ледовых нагрузок от битого льда и сопоставимы с нагрузками от ровного льда. Поэтому, в первом приближении, можно отметить, что обеспечение прочности опорных колонн СПБУ с учетом возможных нагрузок от битого или ровного льда является реальной задачей.

Модельные испытания на определение нагрузок от течения и волнения на СПБУ выполнены по техническому заданию и программе испытаний АО ЦКБ «Коралл» в ФГУП «Крыловский государственный научный центр» [13].

Выводы (Summary)

1. Оценка внешних нагрузок на самоподъемные буровые установки является важной задачей проектирования. Вопросы определения нагрузок от воздействия ветра, течения и волнения являются достаточно проработанными, существует обширный материал модельных и натуральных испытаний, разработаны различные расчетные методики.

2. Определение ледовых нагрузок на СПБУ с ферменными опорами является достаточно сложной и малоизученной задачей, не имеющей на данный момент однозначного решения. Различные теоретические методы определения ледовых нагрузок дают значительно отличающиеся результаты. Более достоверные результаты можно получить с помощью модельных испытаний.

3. Учитывая динамику освоения Арктики, определение нагрузок от полей ровного и битого льда на ферменные конструкции СПБУ является актуальной проблемой, требующей всестороннего решения и внимания специалистов в данной отрасли.

4. Прочность элементов СПБУ (опорные колонны и корпус) для возможной эксплуатации в Арктических морях, должна быть обеспечена с учетом возможного попадания в ледовые условия.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. СП 38.13330.2012. Нагрузки и воздействия на гидротехнические сооружения (волновые, ледовые и от судов). Актуализированная редакция СНиП 2.06.04-82. — М.: Минрегион России, 2012. — 112 с.
2. Правила классификации, постройки и оборудования плавучих буровых установок и морских стационарных платформ. — СПб.: Российский морской регистр судоходства, 2018. — 480 с.
3. ISO 19906: 2010 Petroleum and natural gas industries – Arctic Offshore Structures. — International Organization for Standardization, 2012. — 465 p.

4. ISO 19905-1: 2016 Petroleum and natural gas industries — Site-specific assessment of mobile offshore units – Part 1: Jack-ups. — International Organization for Standardization, 2016. — 320 p.
5. ISO 19905-2: 2012 Petroleum and natural gas industries — Site-specific assessment of mobile offshore units — Part 2: Jack-ups commentary and detailed sample calculation. — International Organization for Standardization, 2012. — 299 p.
6. *Алексеев Ю. Н.* Метод расчета сопротивления льда движению судов / Ю. Н. Алексеев, К. Е. Сазонов // Вопросы судостроения. Сер. Проектирование судов. — 1984. — № 45. — С. 28–36.
7. *Бронников А. В.* Динамика движения ледокола в сплошном ледяном поле / А. В. Бронников // Сб. науч. тр. НТО им. акад. А.Н. Крылова. — Л.: Судостроение, 1972. — № 174. — С. 114–128.
8. *Каштелян В. И.* Сопротивление льда движению судов / В. И. Каштелян, И. И. Позняк, А. Я. Рывлин. — Л.: Судостроение, 1968. — 268 с.
9. *Ногид Л. М.* Моделирование движения судна в сплошном ледяном поле и битых льдах / Л. М. Ногид // Тр. ЛКИ. — 1959. — Вып. XXVIII. — С. 179–185.
10. *Рывлин А. Я.* Испытания судов во льдах / А. Я. Рывлин, Д. Е. Хейсин. — Л.: Судостроение, 1980. — 207 с.
11. *Сазонов К. Е.* Теоретические основы плавания судов во льдах / К. Е. Сазонов. — СПб.: Изд-во ЦНИИ им. акад. А.Н. Крылова, 2010. — 274 с.
12. Разработка концептуального проекта глубоководной ледостойкой самоподъемной плавучей буровой установки (ГСПБУ). Отчет о составной части опытно-конструкторской работы. Раздел итогового научно-технического отчета о результатах ОКР «Ледовые модельные испытания». — Вып. 47060. — СПб.: ФГУП «Крыловский государственный научный центр», 2013. — 48 с.
13. Исследование мореходности и гидродинамических сил от волнения и течения, действующих на глубоководную ледостойкую самоподъемную плавучую буровую установку. Отчет. — Вып. 47093. — СПб.: ФГУП «Крыловский государственный научный центр», 2013. — 95 с.

REFERENCES

1. Russian Federation. Set of rules SP 38.13330.2012. Loads and impacts on Hydraulic structures (from wave, ice and ships). М.: Minregion Rossii, 2012.
2. *Pravila klassifikatsii, postroiki i oborudovaniya plavuchikh burovyykh ustanovok i morskikh statsionarnykh platform.* SPb.: Rossiiskii morskoi registr sudokhodstva, 2018.
3. ISO 19906: 2010 Petroleum and natural gas industries – Arctic Offshore Structures. International Organization for Standardization, 2012.
4. ISO 19905-1: 2016 Petroleum and natural gas industries – Site-specific assessment of mobile offshore units – Part 1: Jack-ups. International Organization for Standardization, 2016.
5. ISO 19905-2: 2012 Petroleum and natural gas industries – Site-specific assessment of mobile offshore units – Part 2: Jack-ups commentary and detailed sample calculation. International Organization for Standardization, 2012.
6. *Alekseev, Yu.N., and K.E. Sazonov.* “Metod rascheta soprotivleniya l'da dvizheniyu sudov.” *Voprosy sudostroeniya. Ser. Proektirovanie sudov* 45 (1984): 28–36.
7. *Bronnikov, A.V.* “Dinamika dvizheniya ledokola v sploshnom ledyanom pole.” *Sb. nauch. tr. / NTO im. akad. A.N. Krylova.* № 174 L.: Sudostroenie, 1972. 114–128.
8. *Kashtelyan, V.I., I.I. Poznyak, and A.Ya. Ryvlin.* *Soprotivlenie l'da dvizheniyu sudov.* L.: Sudostroenie, 1968.
9. *Nogid, L.M.* “Modelirovanie dvizheniya sudna v sploshnom ledyanom pole i bitykh l'dakh.” *Tr. LKI XXVIII* (1959): 179–185.
10. *Ryvlin, A.Ya., and D.E. Kheisin.* *Ispytaniya sudov vo l'dakh.* L.: Sudostroenie, 1980.
11. *Sazonov, K.E.* *Teoreticheskie osnovy plavaniya sudov vo l'dakh.* SPb.: TsNII im. akad. A.N. Krylova, 2010.
12. *Razrabotka kontseptual'nogo proekta glubokovodnoi ledostoikoi samopod'emnoi plavuchej burovoi ustanovki GSPBU.* Otchet o sostavnoi chasti opytно-konstruktorskoj raboty. Razdel itogovogo nauchno-tekhnicheskogo otcheta o rezul'tatakh OKR «Ledovye model'nye ispytaniya». Vyp. 47060. SPb.: FGUP «Krylovskii gosudarstvennyi nauchnyi tsentr», 2013.

13. *Issledovanie morekhnodnosti i gidrodinamicheskikh sil ot volneniya i techeniya, deistvuyushchikh na glubokovodnuyu ledostoikuyu samopod"emnyuyu plavuchuyu burovuyu ustanovku. Otchet. Vyp. 47093. SPb.: FGUP «Krylovskii gosudarstvennyi nauchnyi tsentr», 2013.*

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Благовидова Ирина Львовна —
заместитель начальника отдела общего
проектирования и судовой архитектуры
АО «ЦКБ «Коралл»
299028, Российская Федерация, Севастополь,
ул. Репина, 1
e-mail: blagovidova@yandex.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Blagovidova, Irina L. —
Deputy manager of general engineering
and naval architecture department
CDB «Corall» JSC
1 Repina Str., Sevastopol, 299028,
Russian Federation
e-mail: blagovidova@yandex.ru

Статья поступила в редакцию 16 июля 2018 г.

Received: July 16, 2018.

СУДОВЫЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ УСТАНОВКИ, СИСТЕМЫ И УСТРОЙСТВА

DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-4-770-782

RESEARCH AND DEVELOPMENT OF EFFECTIVE TECHNOLOGY FOR AIR BASIN PROTECTION WHILE SHIP OPERATION

V. Ye. Leonov¹, A. D. Serdyuk²

¹ — Kherson State Maritime Academy, Kherson, Ukraine

² — Kherson sea port, Kherson, Ukraine

Currently, the marine area has two limited areas of special control – SECA and ECA, in which it is permissible to use only low-sulfur fuel, the content of sulfur compounds in which should not exceed 0.1% of the mass, and in the rest of the main part of the sea area it is permissible to use high-sulfur fuel containing no more than 3.5% S-compounds of the mass. The use of low Sulphur fuels is mainly stimulated by environmental concerns – reducing air basin pollution by reducing Sulphur dioxide emissions to the detriment of the economy as the cost of low Sulphur fuels is 2-5 times higher than that of high Sulphur fuels. By the decision of the International Maritime Organization since 01.01.2020 all sea trade and passenger transport are transferred to the low-Sulphur fuel (containing S-compounds no more than 0.5% of the mass.). Exceptions to this are only those vessels that are equipped with exhaust gas purification systems of ship power plants from sulfur compounds, as well as those vessels that conduct research on the development of effective methods of purification from sulfur compounds. The analysis of technical solutions for the treatment of waste gases of ship power plants from sulfur compounds and implemented technologies on some liners are conducted. As an alternative solution for the treatment of exhaust gases of ship power plants from sulfur compounds, a new complex technology is proposed by us, which is fundamentally different from the previously developed. Comparison of two technological schemes is performed by nine main parameters. Recommendations on the introduction of the system of waste gases purification of ship power plants from sulfur compounds on sea vessels when using cheap high-sulfur marine fuel on board vessels are developed. The alternative technology of exhaust gas of ship power plants purification from toxic compounds has undeniable advantages in comparison with the previously developed technology - in depth of purification, heat recovery, the value of prevented damage to the air basin, protection of the marine environment, continuity of the process regardless of the specific situations of the sea crossing, management of the processes of purification and utilization of the heat of exhaust gases of ship power plants – automatic, autonomous from the navigational bridge.

Keywords: marine fuel, sulfur compounds, special control areas, cleaning, ship power plants, exhaust gases, scrubber cleaning, catalytic cleaning, International Maritime Organization, toxic substances, research, degree of conversation.

For citation:

Leonov, Valeriy Ye., and Alexander D. Serdyuk. “Research and development of effective technology for air basin protection while ship operation.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 10.4 (2018): 770–782. DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-4-770-782.

УДК 504.3.054

ИССЛЕДОВАНИЕ И РАЗРАБОТКА ЭФФЕКТИВНОЙ ТЕХНОЛОГИИ ЗАЩИТЫ ВОЗДУШНОГО БАСЕЙНА ПРИ ЭКСПЛУАТАЦИИ СУДОВ

В. Е. Леонов¹, А. Д. Сердюк²

¹ — Херсонская государственная морская академия, Херсон, Украина

² — Херсонский морской торговый порт, Украина, Херсон

В настоящее время морская акватория имеет две ограниченные по площади зоны особого контроля: SECA и ECA, в которых допустимо использовать только низкосернистое топливо, в котором содержание сернистых соединений не должно превышать 0,1 % масс., а в остальной основной части морской акватории используется высокосернистое топливо, содержащее не более 3,5 % масс. S-соед. Использование низкосернистого топлива стимулировано главным образом экологическими аспектами — снижением ущерба воздушному бассейну за счет уменьшения эмиссии сернистого ангидрида — в ущерб экономическим, поскольку стоимость низкосернистого топлива в 2 – 5 раз выше стоимости высокосернистого. По решению Международной морской организации с 01.01.2020 г. весь морской торговый и пассажирский транспорт переводится на низкосернистое топливо (не более 0,5 % масс. S-соед.). Исключение из этого составляют только те суда, которые укомплектованы системами очистки отработанных газов судовых энергетических установок от сернистых соединений, а также суда, на которых проводятся исследования по разработке эффективных способов очистки от сернистых соединений. Проведен анализ технических решений по очистке отработанных газов судовых энергетических установок от сернистых соединений и технологий, реализованных на некоторых круизных судах.

В качестве альтернативного решения по очистке отработанных газов судовых энергетических установок от сернистых соединений нами предложена новая комплексная технология, принципиально отличающаяся от разработанной ранее. По девяти основным параметрам выполнено сравнение двух технологических схем, разработаны рекомендации по внедрению системы очистки отработанных газов судовых энергетических установок от сернистых соединений на морских судах при использовании на борту судов дешевого высокосернистого судового топлива. Альтернативная технология очистки отработанных газов судовых энергетических установок от токсических соединений имеет неоспоримые преимущества по сравнению с разработанной по глубине очистки, утилизации теплоты, величине предотвращенного ущерба воздушному бассейну, защите морской окружающей среды, непрерывности процесса, независимо от конкретных ситуаций морского перехода, управлению процессами очистки и утилизации теплоты отработанных газов СЭУ — автоматическому и автономному со штурманского мостика.

Ключевые слова: судовое топливо, сернистые соединения, зоны особого контроля, очистка, судовые энергетические установки, отработанные газы, скрубберная очистка, каталитическая очистка, Международная морская организация, токсические вещества, исследования, степень превращения.

Для цитирования:

Леонов В. Е. Исследование и разработка эффективной технологии защиты воздушного бассейна при эксплуатации судов / В. Е. Леонов, А. Д. Сердюк // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2018. — Т. 10. — № 4. — С. 770–782. DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-4-770-782.

Introduction

International Maritime Organization (IMO) in order to protect the environment, biosphere, and humans requires reducing the content of Sulfur compounds in marine fuel [1]. During the period from 2012 to 2015, the concentration of sulfur compounds in marine fuel in Special control areas – ECA and SECA – decreased by 10 times - from 1.0 to 0.1% of the mass., in the rest of the shipping world area it decreased by 1.0% - from 4.5 to 3.5% of the mass. During the Session of the Subcommittee on Pollution Prevention and Response (PPR), IMO from 05 to 09.02.2018. (the headquarter of the IMO, London) made the decision to prohibit the use of navigation since 01.01.2020 worldwide the fuel with the high content of sulfur compounds. It was decided to transit to low-Sulfur fuel with no more than 0,5 % Sulphur-compounds of mass., i.e. reduction of sulfur compounds concentration by 7 times. The resolution of the Session states that this prohibition does not apply to vessels with special equipment for the purification of exhaust gases of ship power plants (EG SPP). The use of this Exhaust Gas Clean System (EGCS) will allow reducing the concentration of Sulphur compounds and solid particles in EG SPP (**only two toxicants**), as provided in MARPOL 73/78, Annex V, paragraph 4.1. The prohibition will not apply to vessels involved in research and the development of new systems to reduce emissions of harmful substances and compounds in EG SPP. “The adoption of the amendments will help us to preserve the environment and reduce the number of diseases and premature deaths due to air pollution by exhaust gases from ships,” said John Maggs, senior policy adviser, Seas at Risk and president of the International Clean Shipping Coalition (CSC), commenting on the results of the Session [2].

Methods and Materials

Heterogeneous catalytic method was used to neutralize toxic substances and compounds contained in EG SPP. To select the most selective and active catalysts, a flow-type ideal displacement unit was developed and applied, which included the following units:

- 1) preparation of a reaction mixture of a given composition;
- 2) catalytic reactor apparatus;
- 3) gas chromatographic analysis of initial reaction and post-reaction mixture;
- 4) cooling and condensation of the exhaust gas flow;
- 5) calculation of the degree of neutralization of toxic compounds and determining the activity of catalysts.

The experiments were conducted on the two oxide catalysts: ICT-12-8 and AOC-78-56 in Boreskov Institute of Catalysis as part of Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, fraction 1×1 mm (table 1). The study of the activity of the catalyst was carried out in running unit (reactor of ideal displacement) with a fixed catalyst.

The temperature was controlled by thermocouple; the temperature measurement was ranging between 20-450 degrees Celsius. The carbon monoxide content analysis were carried out by using the detector of the gas chromatograph at the inlet in the reactor apparatus and at the output from it. The CO concentration measurements were taken at least three times. The average value was considered as the measurement result.

Table 1

ICT-12-8 and AOC-78-56 catalyst characteristics

The catalyst	Chemical composition, mass %	Specific surface area, m ² /g
ICT-12-8 in the granules form	CuO – 10 Cr ₂ O ₃ – 10 Al ₂ O ₃ – 80	170
AOC-78-56 in the granules form	Co ₂ O ₃ – 11 Cr ₂ O ₃ – 6 Cr(+VI) no more than 0,05 SiO ₂ – 82,95	110

Results

The EG SPP are consisted of more than 200 harmful toxic components (for simplification we will consider 200 toxic compounds) which are carcinogenic, mutagenic, irritating and poisonous by their nature, relate to the 1-4 classes of dangerous impact on human's health. Furthermore, besides chemical pollution and toxicant conversion which lead to the range of ecological problems, for example, "greenhouse effect", "acid" rains, oxygen deficiency, the EG SPP possess high enthalpy. The temperature of EG SPP in the exhaust path is within 350-500 degrees Celsius, depending on the operating mode of the SPP, which in turn leads to the thermal pollution of the air basin. In connection with the factors mentioned above, from the standpoint of environmental safety, cleaning of EG SPP and reduction its temperature is an urgent problem [3].

The company Wartsila to reduce the emission of Sulphur dioxide from EG SPP offers the following technological directions – the transfer of maritime transport to the low-Sulfur fuel, the use of liquefied natural gas, scrubber cleaning [4]. In the directions mentioned above, Wartsila gives preference to the scrubber cleaning from Sulphur dioxide. In work [5] researches on scrubber cleaning from sulphurous anhydride are carried out and it is defined that the maximum degree of cleaning from SO_x makes 95 %, and from solid particles (soot) — 60 %. It remains unclear under what conditions the above results have been achieved, with or without circulation of the reactive absorbent, whether the degree of purification obtained is sufficient for the safe release of purified gases into the atmosphere.

In work [6] the analysis and generalization of use of catalysts for neutralization of toxic substances and connections is conducted.

In work [7] computational studies on the emission reduction components of “greenhouse” gases in the operation of the courts are conducted. Carbon dioxide, methane, nitrous oxide are the key components of “greenhouse” gases. The calculation was carried out on the condition that the average air temperature should not exceed 2 degrees Celsius in accordance with the Protocol of the Climate Summit (2015, Paris, France). The method of calculation of emission components of “greenhouse” gases released during combustion of marine fuel in the conditions of the regular route and port handling.

In work [8] as a result of survey of shipping companies and ship owners the most effective technologies which will allow to optimize Operational Coefficient of Energy Efficiency of Ships (OCEES) and to reduce considerably emission of carbon dioxide were revealed. The analysis of the possible use of alternative marine fuel, which will reduce carbon dioxide emissions and increase the OCEES.

However, it should be noted that the transfer of ships to alternative fuels will require significant modernization of SPP and large investments, considerable time for modernization.

In works [9] – [10] for the first time studies have been conducted to minimize operating OCEES when changing the main parameters of a real sea crossing – the distance of the transition, the mass of the load, speed of the vessel. On the basis of the developed mathematical model in these works the basic conditions for minimization of OCEES were formulated and, accordingly, recommendations on reduction of carbon dioxide emission – the main component of “greenhouse” gases were developed.

The cruise company “Carnival Corporation” [11] – [12] has developed its own technology for cleaning EG SPP, which allows to reduce to a minimum the content of Sulfur compounds and solid particles (EGCS technology). EGCS technology works during sea crossings, and during stops of the vessel or when maneuvering in port. “Our system is a state-of-the-art, environmentally-friendly technology, and its application attests to the willingness of Carnival Corporation to comply with international norms and regulations,” said M. Kachmarek, Vice President of Carnival Corporation [2].

EGCS technology allows to clean EG SPP only from two pollutants – SO_x and solid particles (soot).

The main stages of EGCS [13]:

1. Cooling the EG SPP with the disposal of excess heat of the EG SPP.
2. Wet scrubber cleaning (absorption process) EG SPP from SO_x and solid particles with an absorbent of 50% NaOH solution mixed with sea water.
3. Cleaning of worked off liquid absorbent from solid particles.
4. Reset the worked off absorbent with SO_x compounds, alkali, solid particles in the marine environment.
5. The release of cleaned EG SPP from SO_x and solid particles into the atmosphere.

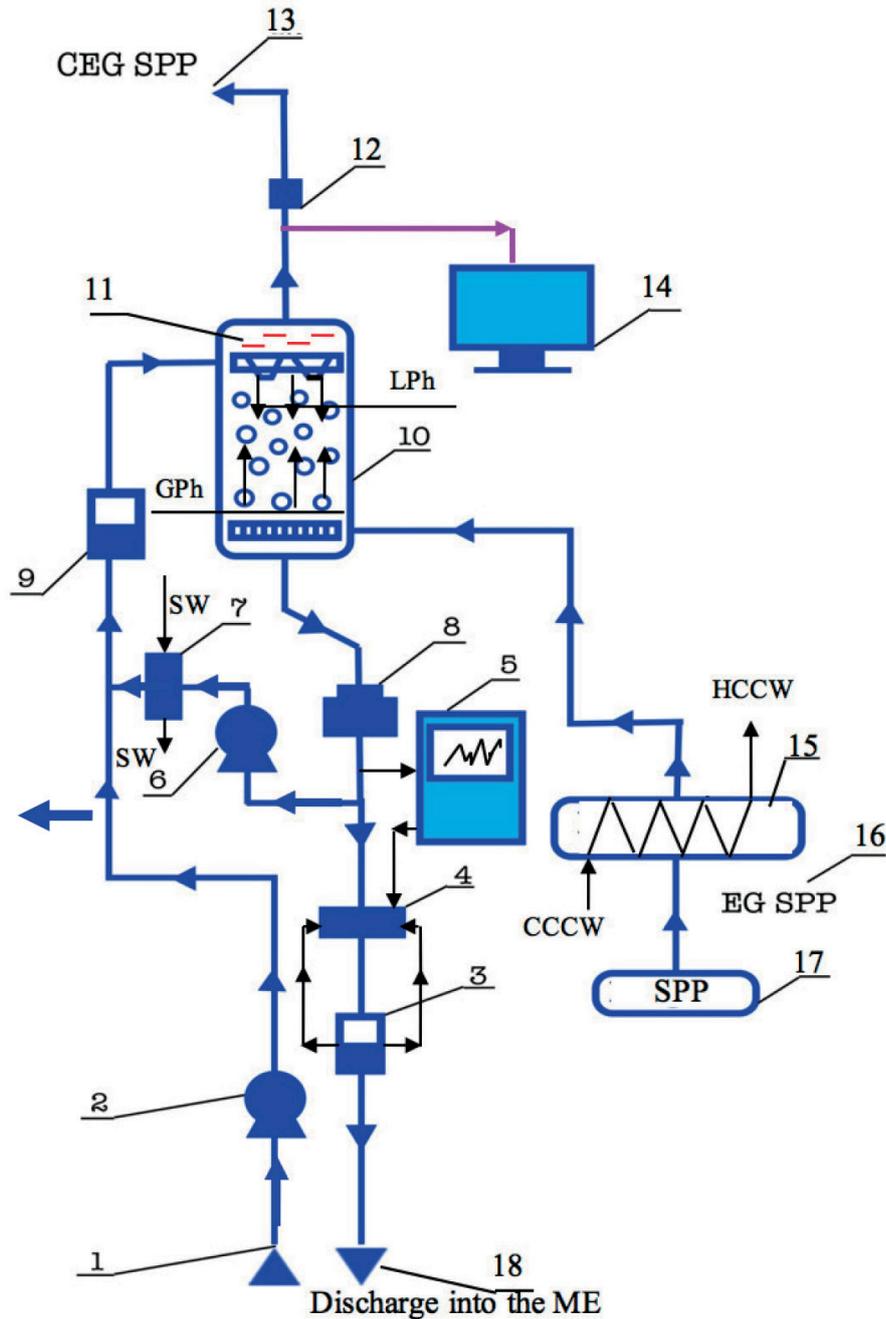
In our opinion, the basis of EGCS technology is the wet scrubber cleaning (stage 2) EG SPP of sulfur compounds with the help of absorbent-50 % NaOH solution mixed with seawater-at a pressure of 10 bar with the help of special spray devices that convert the absorbent into a fine mist phase. As a result, the interaction of SO_2 and SO_3 contained in EG SPP with sodium hydroxide, respectively, formed sulfite and sodium sulfate. At the same time, the degree of purification from SO_2 and SO_3 in EG SPP is at 98% level. In the process of wet scrubber cleaning, in the opinion of the authors of the project, solid particles from EG SPP are absorbed by the absorbent. This is questionable because the solids are hydrophobic and therefore must be released to the atmosphere.

A rather complex technological task is a stage 3 of purification of the worked off absorbent from solid particles, after this stage, the spent absorbent containing sulfite, sulfate, sodium hydroxide, solid particles is discharged into the marine environment.

The flow diagram of EGCS technology is shown in figure 1.

Exhaust gas (pos. 16) after SPP (pos. 17) is supplied to the economizer (pos. 15), in which the EG temperature decreases below 50 degrees Celsius, then enters the lower part of the absorber (pos. 10), where is the counter flow in a spray form, a mist is supplied as the absorbent, containing 50% by weight of sodium hydroxide (lye) mixed with sea water. As a result of the interaction of sulfur oxides with al-

kali sulfites and sodium sulfates are formed, dissolving in the absorbent, in the opinion of the authors, solid particles (soot) are transferred. In general, quite complex in composition and aggressive worked-off absorbent after the absorber (pos. 10) sequentially moves to the container (pos. 8) for averaging, particle cleaning system (pos. 4), the quality analyzer (pos. 3) and further discharged into the marine environment (pos. 18). The scheme provides recycling of spent absorbent after the tank (pos. 8) part of the spent absorbent pump (pos.6) through the condenser (pos. 7), the quality analyzer (pos. 9) fed to the upper part of the absorber (pos. 10). The purified EG SPP (pos. 13) is thrown out into atmosphere.



Specification of appliance: 1 – enter the absorbent material (50 % mass. NaOH + 50 % mass., sea water (SW)); 2, 6 – pump; 3, 9 – quality analyzer; 4 – exhaust absorbent cleaning system; 5 – control panel; 7 – refrigerator; 8 – capacity for averaging; 10 – the absorber countercurrent type; 11 – jackhammer devices; 12 – laser type gas analyzer; 13 – the emission EG SPP; 14 – the emission controller of EG SPP; 15 – economizer; 16 – exhaust gas after SPP; 17 – SPP; 18 – discharge of worked off absorbent in SW.

Symbols: ME-marine envир – sodium hydroxide; LPh – liquid phase; GPh – gaseous phase; SPP – ship power plant; CEG SPP – cleaned EG SPP

Fig. 1. The diagram of the EG SPP purification by «Carnival Corporation» company [11] – [13]

It is of scientific and practical interest to consider an alternative technical solution for cleaning EG SPP from toxic components developed by us [3].

IMO aims to create a highly efficient, environmentally safe, trouble-free ship that meets the high level of Constructional CEES (CCEES) in the 2020-2025 years [14] – [16].

To implement this general direction, the complete solution of technological tasks for purifying EG SPP, and heat utilization shall be offered.

The main stages of the complex process are [3]:

1. Quantitative high-temperature purification of EG SPP from soot.
2. Catalytic purification, neutralization of toxic substances and compounds contained in the EG SPP.
 - 2.1. By means of catalytic oxidation.
 - 2.2. Method of catalytic reduction.
3. Dual circuit technology for utilization of excess heat of the EG SPP.
4. Cooling the EG SPP to the temperature of 20-30 degrees Celsius.
5. Absorption of sulfuric anhydride condensate to produce sulfuric acid.

The technology of heat recovery of the EG SPP provides:

- 1) the continuity of the utilizing process of the EG SPP;
- 2) the increase in the efficiency of SPP, voyage, minimizing the OCEES.

There is a brief description of the process below (fig. 2):

EG SPP from the main marine engine (1) at a temperature of 400 degrees Celsius enter the turbine (2) and then go into the electro filter (diffusional filter) (3), catalytic reactor unit (4), which is equipped with oxidation and reduction catalysts. At a temperature of 363.6 degrees Celsius, the EG SPP enter the economizer (7), where heat is exchanged with water circuits, then at a temperature of 54 degrees Celsius enter the refrigerator-condenser (19), in which the temperature decreases to 25 degrees Celsius, into the scrubber (17), where sulfuric acid is formed, the latter is collected in a container (18).

There is a brief description of the process below (fig. 2):

EG SPP from the main marine engine (1) at a temperature of 400 degrees Celsius enter the turbine (2) and then go into the electro filter (diffusional filter) (3), catalytic reactor unit (4), which is equipped with oxidation and reduction catalysts. At a temperature of 363.6 degrees Celsius, the EG SPP enter the economizer (7), where heat is exchanged with water circuits, then at a temperature of 54 degrees Celsius enter the refrigerator-condenser (19), in which the temperature decreases to 25 degrees Celsius, into the scrubber (17), where sulfuric acid is formed, the latter is collected in a container (18).

1. The contour of the condensate from the container (12) at a temperature of 25 – 45 degrees Celsius, is pumped (6) the condensate in the primary heat exchange circuit is heated to 100 degrees Celsius and is supplied to the main distribution tank (9), which is automatically displayed in the secondary circuit of the economizer (7), which is produced by the vapor pressure of 14 kgf/cm², is used to drive the steam turbine (16) and/or the production of electricity by a generator (15) or steam is supplied to steam turbine installation (11), where it is used as extra power for propulsive system of the vessel. After energy is transferred to the turbine (16 or 11), the exhaust steam is returned as condensate to the tank (12).

2. The air circuit-passes through the delivery part of the twin turbine, the heat exchanger for cooling the engine and fuel-air enters the marine engine.

For cooling the processed EG SPP to 15–25 degrees Celsius in the refrigerator condenser (19) and receiving additional economy of energy it is offered to use ship diesel fuel as the cooling agent.

In order to ensure the operation of the second stage of the process-catalytic neutralization of toxic components of EG SPP, studies have been carried out on a flow type unit for the selection of the most active and selective catalyst. In work [17] we have for the first time established that for a class of catalytic oxidation of toxic connections instead of the big nomenclature of harmful substances and connections it is possible to simplify the researches on the catalyst choice considerably, using as initial raw materials only carbon monoxide in mixture with air.

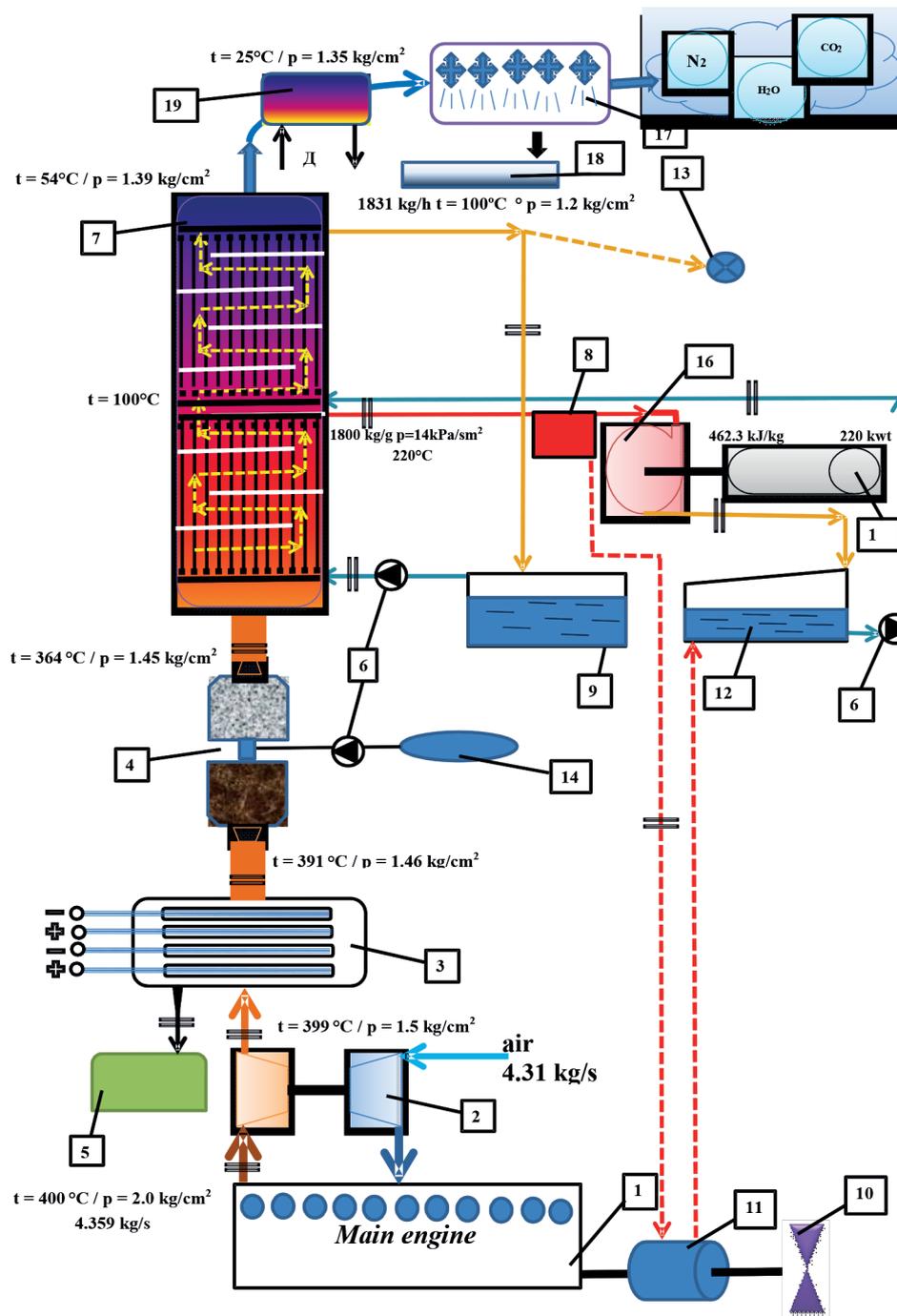


Fig. 2. Scheme of purification from toxic compounds of the EG SPP and utilization of heat of the EG SPP for a «OXL SAMURAI» ship [3]

The mass of catalyst which was loaded in the reactor ICT-12-8 was 90 mg. The degree of carbon monoxide conversion was changed from 28 % to 82 % (table 2, 3).

Table 2

Results of research on ICT-12-8 at the 11 cm³/s gas mixture flow

№	T, °C	Cco (input), mg/m ³	Cco (output), mg/m ³	Xco, %	K*, mm ³ /s × g	LnK
1	160	123	89	28	33,76	3,56
2	160	123	90	26	31,78	3,46
3	210	123	60	51	74,83	4,32
4	260	123	34	72	132,88	4,89

Table 3

Results of research on AOC-78-56 at the 11 cm³/s gas mixture flow

№	T, °C	Cco (input), mg/m ³	Cco (output), mg/m ³	Xco, %	K*, mm ³ /s × g	LnK
1	150	123	73,60	40,28	2,83	1,04
2	150	123	73,60	40,28	2,83	1,04
3	200	123	34,23	72,22	7,03	1,95
4	250	123	22,25	81,94	9,40	2,24

Note:

1. X_{CO} is the degree of conversion of carbon monoxide, %.
2. K* is the rate constant of the chemical oxidation reaction of CO, mm³/s×g.

According to the study of the carbon monoxide oxidation on ICT-12-8 and AOC-78-56 catalysts following points should be mentioned:

1. The oxidation rate of carbon monoxide on ICT-12-8 and AOC-78-56 catalyst increases with an increase in temperature.
 2. The ICT-12-8 catalyst is the most active one, because at equal temperatures the rate constant of a chemical reaction on ICT-12-8 catalyst is much more, than on the AOC-78-56 catalyst.
 3. The work on the ICT-12-8 catalyst allows to save catalyst mass which is loaded in the reactor, meanwhile operations under the same conditions on the AOC-78-56 catalyst require the 15 times more catalyst mass loaded in than the used on the ICT-12-8 catalyst. It indicates the predominant activity of the ICT-12-8 catalyst.
- Therefore, for catalytic neutralization of toxic components of EG SPP (second stage), the ICT-12-8 catalyst, equipped in reactors, is recommended (fig. 3, 4).

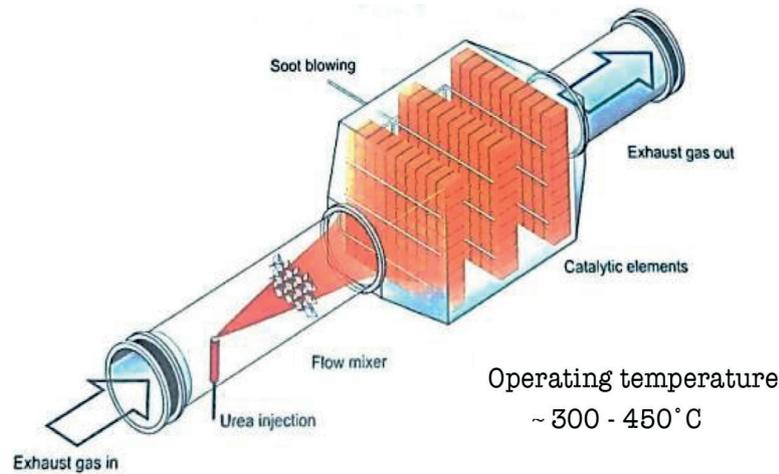
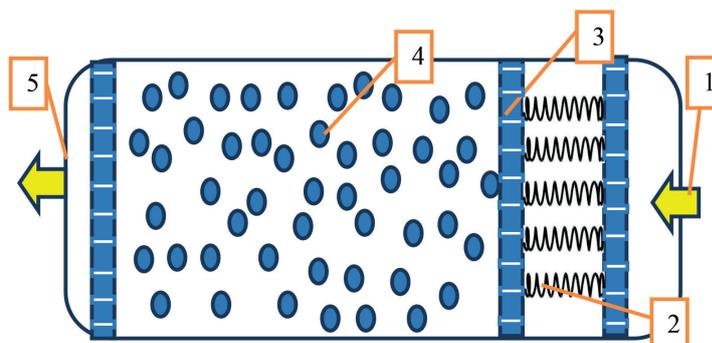


Fig. 3. Reactor apparatus with NO_x reduction catalyst of the block type



1 — input collector of the original EG SPP, 2 — compensation devices, 3 — movable plate under the effect of the compensation devices, 4 — catalyst granules, 5 — output collector of the cleaned EG SPP

Fig. 4. Reactor apparatus with a oxidation catalyst [3]

The structure of distribution of the EG SPP recovered heat is presented in figure 5.

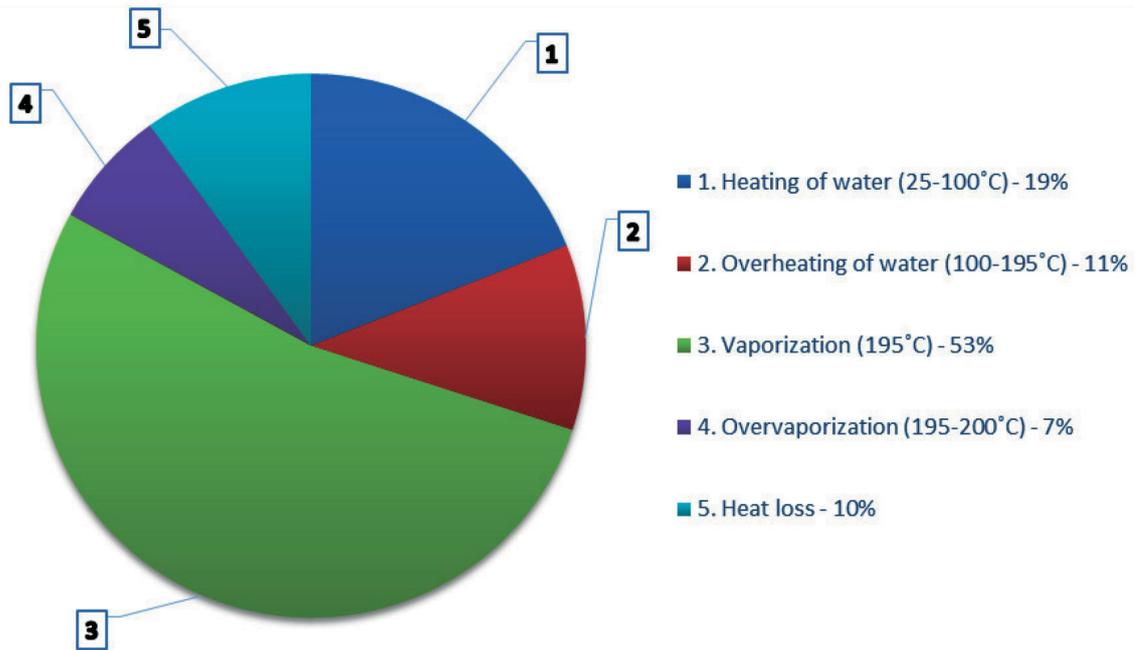


Fig. 5. The degree of EG SPP heat usage (%)

Most of the recuperated heat (60 %) is converted into process steam of high parameters, 30 % – for water heating, heat losses are comprised 10 %.

On the basis of the carried out researches and calculations layout decisions on placement of complex installation “cleaning – utilization of heat – cleaning” EG SPP in machine-boiler room office in relation to the real motor ship “OXL SAMURAI” are developed.

The developed technology is designed to be implemented directly on board the vessel and allows, in comparison with known proposals, to solve the following main issues of navigation in the framework of improving the energy efficiency and environmental safety of the vessel/voyage, minimizing OCEES:

- 1) use on board the vessel cheap high-sulfur heavy fuel IFO 380 (3,5 % Sulphur compounds by mass.);
- 2) improve the economic performance of the ship, the voyage through the utilization of the heat of the EG SPP and obtaining target products;
- 3) to ensure the environmental safety of the marine environment in the operation of ships, regardless of their design, type, cargo and route.

Thus, the following ecological and economic problems of shipping are solved as a result of the performed complex innovative technology of purification and utilization of heat of the EG SPP:

1. Application on Board of the vessel at sea cargo transportation of cheap high-sulfur diesel fuel in areas of special control SECA, ECA, and from 01.01. 2020 — around the world.
2. Sanitary cleaning of the EG SPP to a safe level is provided for all toxic components and, in particular, for Sulphur compounds and solid particles.
3. Deep utilization of the heat of the EG SPP and their purification is carried out.
4. EG SPP after sequential processing directly on board of the ship turn the target commodity products.
5. Increases the economic efficiency of shipping, efficiency of voyage, ensures the protection of the marine environment.
6. The payback period of the integrated process unit does not exceed three years.

Discussion

The analysis and generalization of technical solutions for purification of the EG SPP of Carnival Corporation company (EGCS) and suggested by our group of specialists is conducted (table 4).

Table 4

Comparison of the purification and heat utilization systems of EG SPP

№	Indicators	Carnival Corporation	Variation		New technological solution	Variation	
			+	-		+	-
1	Cleaning method of EG SPP	Scrubber cleaning - absorption		✓	Electrodifusion cleaning from soot, catalytic neutralization of EG SPP toxic compounds	✓	
2	Materials	50% mass NaOH with seawater, chemically cleaned water		✓	Catalysts, chemically cleaned water	✓	
3	Purification of EG SPP	Cleans from SO _x compounds and solid particles		✓	Cleans from all EG SPP toxic compounds	✓	
4	Repeated pollution of the environment	Marine environment is polluted by sulfite, sulfate, sodium hydroxide, soot		✓	No repeated pollution of the environment	P	
5	Heat utilization of EG SPP	Economizer is used	✓		Two-circuit heat recovery system is used	✓	
6	Payback period of the installation	Three years	✓		Less than three years	✓	
7	Operating mode of the installation	In ports, when maneuvering and sea crossings	✓		In ports, when maneuvering and sea crossings	✓	
8*	Prevented damage to the air basin, \$/year	2 000 000		✓	10 000 000	✓	
9	Ecological compatibility of new technical solutions	Transfer of toxicants from the gas phase (EG SPP) to the marine environment		✓	Transfer of toxicants(EG SPP) to the neutral compounds and target products	✓	
	TOTAL		Three (+) Six (-)			Nine (+)	

Note. Calculations on item 8 are made for mv "OXL SAMURAI".

As a result of technical and economic analysis of two technological schemes of the Carnival Corporation company and technology developed by our group of specialists, our team should conclude that we have developed technological scheme which has undeniable advantages in comparison with the Carnival Corporation company, which is a consequence of the following scheme parameters:

- 1) efficiency due to the cleaning and neutralization of all toxic compounds contained in the EG SPP, in comparison with **only two toxicants by Carnival Corporation company**;
- 2) ecological safety, due to the combined effect of neutralizing the toxic compounds contained in the EG SPP, and convert the final target in production while the technology by Carnival Corporation company is organized to transfer pollutants from the gas phase of the EG SPP into the liquid marine environment;
- 3) the value of the prevented damage to the air basin under similar conditions is five times greater in comparison with the technological scheme of Carnival Corporation.

Conclusion

The decision of the Session of the Marine Environment Protection Committee of the International Maritime Organization requires to use the low-Sulphur fuel containing no more than 0.5% Sulphur-compounds of the mass on ships from 01.01.2020 worldwide. This IMO requirement does not affect vessels

equipped with exhaust gas cleaning systems of SPP, as well as those vessels that conduct research on the development of effective methods of purification from sulfur compounds

The analysis of well-known technical solutions for EG SPP purification are performed, among which there are such companies as Carnival Corporation, Wartsilla, which have developed a scrubber cleaning method of EG SPP from sulfur compounds (fig. 1). The technology of the EG SPP purification from toxic compounds developed by a group of specialists of Kherson State Maritime Academy under the guidance of Professor Leonov V. Ye. (fig. 2) is suggested. A comparison of the two processing schemes is done according to nine parameters. As a result, the undeniable advantage of second technology is determined.

We consider it appropriate to conduct a feasibility study of the two technologies under the auspices of the Committee for the Protection of the Marine Environment of the International Maritime Organization with the objective to choose the technology for purifying EG SPP for implementation on maritime transport.

Acknowledgement

Authors wish to express gratitude to captains Gurov A. A., Pivovarov L. A., PhD Tovstokoryiy O. N. who took part in discussion of particular parts of our research work and who provided remarks on some points of this article.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. MARPOL Consolidated edition 2011: Articles, Protocols, Annexes and Unified Interpretations of the International Convention for the Prevention of Pollution from Ships, 1973 as modified by the 1978 and 1997 Protocols. — London: CPI Group (UK) Ltd, 2011. — 448 p.
2. IMO поддержала запрет на топливо с высоким содержанием серы. Работник моря // Всеукраинская морская газета. — 28 февраля 2018. — № 04 (140). — С. 14.
3. *Леонов В. Е.* Защита окружающей среды при эксплуатации судов: монография. / В. Е. Леонов, В. И. Дмитриев. — М.: МОРКНИГА, 2017. — 252 с.
4. *Paulsrud H. M.J.* A Practical Guide to Wärtsilä Scrubber Systems / H. M.J Paulsrud // Journal of the JIME. — 2015. — Vol. 50. — Is. 3. — Pp. 40–42. DOI: 10.5988/jime.50.315.
5. *Tran T. A.* Research of the Scrubber Systems to Clean Marine Diesel Engine Exhaust Gases on Ships / T. A. Tran // Journal of Marine Science: Research & Development. — 2017. — Vol. 7. — Is. 6. — Pp. 243. DOI: 10.4172/2155-9910.1000243.
6. *Laursen A.* Availability of elements for heterogeneous catalysis: Predicting the industrial viability of novel catalysts / A. Laursen, J. Sehested, Ib. Chorkendorff, P. C. K. Vesborg // Chinese Journal of Catalysis. — 2018. — Vol. 39. — Pp. 16–26. DOI: 10.1016/S1872-2067(17)62979-6.
7. *Winnes H.* Reducing GHG emissions from ships in port areas / H. Winnes, L. Styhre, E. Fridell // Research in Transportation Business & Management. — 2015. — Vol. 17. — Pp. 73–82. DOI: 10.1016/j.rtbm.2015.10.008.
8. *Rehmatulla N.* The Implementation of Technical Energy Efficiency and CO2 Emission Reduction Measures in Shipping / N. Rehmatulla, J. Calleya, T. Smith // Ocean Engineering. — 2017. — Vol. 139. — Pp. 184–197. DOI: 10.1016/j.oceaneng.2017.04.029.
9. *Zhmur V. N.* Ways to increase economic energy efficiency and environmental safety of sea freight / V. N. Zhmur, V. Ye. Leonov // American Scientific Journal. — 2018. — Vol. 19. — Pp. 15–21.
10. *Леонов В. Е.* Исследование влияния параметров морского перехода на операционный коэффициент энергетической эффективности судна / В. Е. Леонов, В. В. Тимошенко // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2018. — Т. 10. — № 2. — С. 390–401. DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-2-390-401.
11. Carnival committed to EGCS as its 2020 compliance solution [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://ibia.net/carnival-committed-to-egcs-as-its-2020-compliance-solution/> (дата обращения: 20.04.2018).
12. Carnival Corporation & PLC. Sustainability [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <http://www.carnivalcorp.com/phoenix.zhtml?c=140690&p=irol-sustainability> (дата обращения: 20.04.2018).
13. Carnival Corporation's Exhaust Gas Cleaning Technology installed on 60 percent of fleet [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://www.prnewswire.com/news-releases/carnival-corporations-exhaust-gas-cleaning-technology-installed-on-60-percent-of-fleet-300413964.html> (дата обращения: 20.04.2018).

14. Пивоваров Л. А. Разработка плана управления энергоэффективностью судна (ПУЭЭС) для танкеров / Л. А. Пивоваров // Сборник материалов Международной научно-практической конференции «Современные информационные и инновационные технологии на транспорте» – MINTT-2013. — Херсон: ИЦ ХГМА, 2013. — Т. 1. — С. 73–77.

15. MEPC 65/INF.17 IMO Model Course on Energy-Efficient Operation of Ships. — London: World Maritime University, 2013. — 61 p.

16. Guidelines for voluntary use of the ship energy efficiency Operational indicator (EEOI). — London: IMO, 2009. — 75 p.

17. Леонов В. Е. Очистка отработанных газов энергосиловых установок / В. Е. Леонов, Н. В. Усова, А. П. Данилов // Экотехнологии и ресурсосбережение. — 2007. — № 1. — С. 77–79.

REFERENCES

1. *MARPOL Consolidated edition 2011: Articles, Protocols, Annexes and Unified Interpretations of the International Convention for the Prevention of Pollution from Ships, 1973 as modified by the 1978 and 1997 Protocols*. London: CPI Group (UK) Ltd, 2011.

2. “IMO podderzhala zapret na toplivo s vyisokim sodержaniem seryi.” *Rabotnik morya. Vseukrainskaya morskaya gazeta* 04(140) (2018): 14

3. Leonov, V.Ye., and V.I. Dmitriev. *Zaschita okružhayushey sredy pri ekspluatatsii sudov: monografiya*. M.: MORKNIGA, 2017.

4. Paulsrud, Heidi MJ. “A Practical Guide to Wärtsilä Scrubber Systems.” *Journal of the JIME* 50.3 (2015): 40–42. DOI: 10.5988/jime.50.315.

5. Tran, T. A. “Research of the Scrubber Systems to Clean Marine Diesel Engine Exhaust Gases on Ships.” *Journal of Marine Science: Research & Development* 7.6 (2017): 243. DOI: 10.4172/2155-9910.1000243.

6. Laursen, Anders B. “Availability of elements for heterogeneous catalysis: Predicting the industrial viability of novel catalysts.” *Chinese Journal of Catalysis* 39 (2018): 16–26. DOI: 10.1016/S1872-2067(17)62979-6.

7. Winnes, Hulda, Linda Styhre, and Erik Fridell. “Reducing GHG emissions from ships in port areas.” *Research in Transportation Business & Management* 17 (2015): 73–82. DOI: 10.1016/j.rtbm.2015.10.008.

8. Rehmatulla, Nishatabbas, John Calleya, and Tristan Smith. “The implementation of technical energy efficiency and CO2 emission reduction measures in shipping.” *Ocean Engineering* 139 (2017): 184–197. DOI: 10.1016/j.oceaneng.2017.04.029.

9. Zhmur, V.N., and V.Ye. Leonov. “Ways to increase economic energy efficiency and environmental safety of sea freight.” *American Scientific Journal* 19 (2018): 15–21.

10. Leonov, Valery Ye., and Vladislav V. Timoshenko. “Investigation of the impact of marine transition parameters on the operational coefficient of energy efficiency of the ship.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova* 10.2 (2018): 390–401. DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-2-390-401.

11. Carnival committed to EGCS as its 2020 compliance solution. Web. 20 April 2018 <<https://ibia.net/carnival-committed-to-egcs-as-its-2020-compliance-solution/>>.

12. Carnival Corporation & PLC. Sustainability. Web. 20 April 2018 <<http://www.carnivalcorp.com/phoenix.zhtml?c=140690&p=irol-sustainability>>.

13. Carnival Corporation’s Exhaust Gas Cleaning Technology installed on 60 percent of fleet. Web. 20 April 2018 <<https://www.prnewswire.com/news-releases/carnival-corporations-exhaust-gas-cleaning-technology-installed-on-60-percent-of-fleet-300413964.html>>.

14. Pivovarov, L.A. “Razrabotka plana upravleniya energoeffektivnost’yu sudna (PUUES) dlya tankerov.” *Sbornik materialov Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii «Sovremennye informatsionnye i innovatsionnye tekhnologii na transporte» – MINTT-2013*. Vol. 1. Kherson: ITs KhGMA, 2013. 73–77.

15. MEPC 65/INF.17 IMO Model Course on Energy-Efficient Operation of Ships. London: World Maritime University, 2013.

16. *Guidelines for voluntary use of the ship energy efficiency Operational indicator (EEOI)*. London: IMO, 2009.

17. Leonov, V.E., and A.P. Danilov. “Ochistka otrabotannykh gazov energosilovykh ustanovok.” *Ekotekhnologii i resursoberezhenie* 1 (2007): 77–79.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Леонов Валерий Евгеньевич —
доктор технических наук, профессор
Херсонская государственная морская академия
73000, Украина, Херсон, проспект Ушакова, 20
e-mail: leonov_v_e@i.ua
Сердюк Александр Дмитриевич —
второй помощник капитана теплохода
m/v “Maria-1”
Херсонский морской торговый порт
73000, Украина, Херсон, ул. Потемкинская, 3
e-mail: alexanderserdyuk@ukr.net

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Leonov, Valeriy Ye. —
Dr. of Technical Sciences, professor
Kherson State Maritime Academy
20 Ushakova Avenue, Kherson, 73000, Ukraine
e-mail: leonov_v_e@i.ua
Serdyuk, Alexander D. —
Second officer, m/v “Maria-1”
Kherson sea port
3 Potemkinskaya Str., 73000,
Kherson, Ukraine
e-mail: alexanderserdyuk@ukr.net

*Статья поступила в редакцию 3 мая 2018 г.
Received: May 3, 2018.*

DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-4-783-792

THE USE OF FUEL OIL FOR DIESEL-GENERATOR WORKING IN OIL FIELDS

S. P. Stolyarov¹, V. V. Gavrilov², V. Y. Maschenko¹

¹ — Saint-Petersburg marine technical University, St. Petersburg, Russian Federation

² — Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping,
St. Petersburg, Russian Federation

The use of crude oil as fuel for diesel engines operated in remote areas of oil production, is very relevant to Russia. The solution of the problem will minimize the transportation costs for delivery of fuel for the engines and therefore greatly reduce the cost produced by both electric and possibly heat energy for the needs of oil fields.

Among the main problems of the translation of the diesel engine on fuel oil – the need for fuel treatment by heating and separation; high aggressive content of sulfur and vanadium; high wax content, high carbon deposition etc. At the same start, warm-up, transient operation modes and stop the diesel running is done on light diesel fuel; operation under load is done the fuel oil. In the conditions of the containerized power plants to try constructively to implement the fuel system of a diesel engine is designed for operation on fuel oil unlikely to be appropriate. Thus, the actual problem of designers of diesel engines and fuel systems, is developing constructive activities, aimed at maximizing the reliability and safety of operation of diesel generators running on fuel oil, especially in the subarctic climate.

The article presents a review and synthesis of experience as the world (MAN, Catterpillar, Wartsila) and domestic engine manufacturers (Kolomna plant).

The main attention is paid to modern domestic development – plant container-type “STAR - ZN -1650 VC -05 M3/NP” for prolonged use oil-3 grade (GOST R 51858 – 2002). Work performed by JSC “Zvezda-ENERGETIKA” by the order of JSC “Zarubezhneft”. The power plant is designed using the gas engine-generator 12 NDG (diesel 12 GDCN 26/26 JSC HC “Kolomna plant”) and installation for the preparation of oil of JSC “Konver”.

Detail the problem of crystallization of paraffin hydrocarbons. The fact that drop down into the sediment paraffins can be deposited on the surfaces of the parts of the fuel system to clog the filters of thin clearing of fuel. This will cause disturbance of the fuel supply to the fuel equipment, to correct which may require a complete overhaul of the fuel system (including fuel injection equipment), for cleaning and rinsing.

The authors propose a principled solution to the problem of deposition of paraffin, which is to preheat the diesel fuel and the use of depressor additives improving low-temperature properties of oil. For a detailed study of the proposed technology and verification of appropriate technical solutions necessary to carry out experimental work, in particular, under operating conditions.

Keywords: diesel generator, fuel oil, electric power station, fuel system, asphalt and resin paraffin deposits, high paraffin oil, paraffin oil saturation temperature.

For citation:

Stolyarov, Sergey P., Vladimir V. Gavrilov, and Vladimir Yu. Mashchenko. “The use of fuel oil for diesel-generator working in oil fields.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 10.4 (2018): 783–792. DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-4-783-792.

УДК 621.436

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ НЕФТИ В КАЧЕСТВЕ ТОПЛИВА ДЛЯ ДИЗЕЛЬ-ГЕНЕРАТОРОВ, РАБОТАЮЩИХ В УСЛОВИЯХ НЕФТЕПРОМЫСЛОВ

С. П. Столяров¹, В. В. Гаврилов², В. Ю. Машченко¹

¹ — ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный морской технический университет», Санкт-Петербург, Российская Федерация

² — ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала С.О. Макарова»,
Санкт-Петербург, Российская Федерация

Задача использования сырой нефти в качестве топлива для дизельных двигателей, эксплуатирующихся в труднодоступных районах добычи нефти, является весьма актуальной для России. Решение по-

ставленной задачи обеспечит минимизацию транспортных расходов на доставку топлива для рассматриваемых двигателей и, следовательно, существенно снизит себестоимость вырабатываемой не только электрической, но и, возможно, тепловой энергии для нужд нефтепромыслов.

Среди основных проблем перевода дизельного двигателя на многофракционную топливную нефть — необходимость подготовки топлива путем подогрева и сепарации, высокое содержание агрессивных серы и ванадия, высокое содержание парафинов; высокое нагарообразование и др. При этом пуск, прогрев, переходные режимы работы и остановка дизеля выполняются на легком дизельном топливе, режим работы под нагрузкой — на топливной нефти. В условиях электростанции контейнерного исполнения предпринимать попытку реализации топливной системы дизеля, предназначенной для его работы на одной лишь топливной нефти, вряд ли целесообразно. Таким образом, актуальной задачей конструкторов дизелей и топливных систем, является разработка конструктивных мероприятий, направленных на максимальную надежность и безопасность эксплуатации дизель-генераторов, работающих на топливной нефти, особенно в условиях субарктического климата.

Подробно рассмотрена проблема кристаллизации парафиновых углеводородов, поскольку выпадающие в осадок парафины могут откладываться на поверхностях деталей топливной системы и забивать фильтры тонкой очистки топлива. Это вызовет нарушение подачи топлива к топливной аппаратуре, для устранения которого может потребоваться полная переборка топливной системы (в том числе топливной аппаратуры) для ее очистки и промывки.

Предложены принципиальные решения проблемы выпадения парафина, которые заключаются в предварительном подогреве дизельного топлива, а также в использовании депрессорных присадок, улучшающих низкотемпературные свойства нефти. Для детальной проработки предлагаемой технологии и проверки соответствующих технических решений необходимо проведение опытных работ, в частности, в условиях эксплуатации.

Ключевые слова: дизель-генератор, топливная нефть, электростанция, топливная система, асфальтосмолопарафиновые отложения, высокопарафинистая нефть, температура насыщения нефти парафином.

Для цитирования:

Столяров С. П. Использование нефти в качестве топлива для дизель-генераторов, работающих в условиях нефтепромыслов / С. П. Столяров, В. В. Гаврилов, В. Ю. Машенко // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2018. — Т. 10. — № 4. — С. 783–792. DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-4-783-792.

Введение (Introduction)

Задача использования сырой нефти в качестве топлива для дизельных двигателей, эксплуатирующихся в труднодоступных районах добычи нефти, является весьма актуальной для России. Как правило, нефтеперерабатывающие заводы существенно удалены от районов добычи. Поэтому решение поставленной задачи обеспечит минимизацию транспортных расходов на доставку топлива для рассматриваемых двигателей и, следовательно, существенно снизит себестоимость вырабатываемой не только электрической, но и, возможно, тепловой энергии для нужд нефтепромыслов.

Проблемы перевода дизельного двигателя на многофракционную топливную нефть известны. В целом они не только в значительной мере повторяют проблемы обеспечения работы дизеля на тяжелом топливе: необходимость подготовки топлива путем подогрева и сепарации; высокое содержание агрессивных серы и ванадия; высокое содержание парафинов; высокое нагарообразование и др., но и требуют выполнения требований пожарной безопасности ввиду наличия в нефти легко испаряющихся фракций (например, бензина) при работе в непосредственной близости к электрооборудованию и горячим поверхностям газовыпускной системы.

Как правило, пуск, прогрев, переходные режимы работы и остановка дизеля выполняются на легком дизельном топливе, режим работы под нагрузкой — на топливной нефти. Считается, что в условиях электростанции контейнерного исполнения пытаться конструктивно реализовать топливную систему дизеля, предназначенную для его работы на одной лишь топливной нефти, вряд ли целесообразно и, по всей видимости, невозможно. Таким образом, актуальной задачей конструкторов дизелей и топливных систем является разработка конструктивных мероприятий,

направленных на максимальную надежность и безопасность эксплуатации дизель-генераторов, работающих на топливной нефти, особенно в условиях субарктического климата.

Методы и материалы (Methods and Materials)

Опыт мировых лидеров в двигателестроении. Одним из мировых лидеров в двигателестроении, работающих в направлении использования нефти в качестве топлива для дизельных двигателей, является компания «MAN Diesel & Turbo», которая в 1986 г. предложила некоторые технические решения для работы дизеля на топливной нефти [1]. К настоящему времени эта компания поставила по всему миру десятки дизелей различных моделей и сейчас предлагает дизели модельного ряда V28/32S в V-образном исполнении с 16 или 18 цилиндрами для электростанций мощностью 3610 – 4060 кВт, работающих на нефти. В пресс-релизе, опубликованном 19 ноября 2015 г. на официальном сайте журнала «Турбины и дизели» [2], представлена информация о постройке в Ненецком автономном округе дизельной электростанции общей мощностью 6690 кВт, предназначенной для работы на нефти Колвинского месторождения. К сожалению, сведения о конструкции топливной системы и топливной аппаратуры, а также об опыте эксплуатации дизелей компании «MAN Diesel & Turbo» на топливной нефти авторами статьи не обнаружены.

В 2008 г. в поселке Еруда Северо-Енисейского района Красноярского края введена в эксплуатацию электростанция общей мощностью 17,2 МВт, состоящая из четырех дизель-генераторов. Двигателями электростанции являются четырехтактные дизели модели D3616 еще одного известного мирового производителя — компании Caterpillar (США) — со следующими параметрами и показателями:

- количество и расположение цилиндров — 16, V-образное;
- диаметр цилиндра и ход поршня — 280 мм и 300 мм;
- система наддува — два газотурбокомпрессора с промежуточным охлаждением наддувочного воздуха;
- частота вращения коленчатого вала 1000 мин⁻¹;
- номинальная мощность на клеммах генератора 4300 кВт;
- удельный эффективный расход топлива 0,209^{+5%} кг/(кВт·ч) при удельной теплоте сгорания топлива 42780 кДж/кг.

Топливом дизелей является сырая нефть, подаваемая по специально проложенному трубопроводу с Юрубчено-Тохомского месторождения [3]. Установка для подготовки топливной нефти разработана и поставлена компанией GEA Westfalia (Германия). Основными функциями, выполняемыми установкой, являются:

- отделение воды и механических примесей методами отстаивания и сепарации;
- поддержание заданной температуры и давления на входе в дизель;
- многоступенчатая фильтрация до тонкости очистки 12 мкм.

Описываемая электростанция стационарного типа с установкой дизель-генераторов находится в здании ангарного типа и размещена рядом с двенадцатью топливными резервуарами емкостью по 3000 м³.

Компания Wärtsilä (Финляндия) предлагает на рынке двигатели семейства Wärtsilä 32, способные работать в условиях Арктики, со следующими параметрами и показателями [4]:

- количество и расположение цилиндров — 6, 7, 8, 9-рядное; 16, 18 — V-образное;
- диаметр цилиндра и ход поршня — 320 и 400 мм;
- система наддува — один или два газотурбокомпрессора с промежуточным охлаждением наддувочного воздуха;
- частота вращения коленчатого вала — 720 или 750 мин⁻¹;
- номинальная мощность от 2880 кВт до 10800 кВт.

Двигатели Wärtsilä 32 предназначены для эксплуатации не только на традиционных видах дистиллятного или тяжелого топлива для дизелей, но также и на сырой нефти в соответствии

со спецификацией (см. таблицу). Причем обязательным требованием является удаление из нефти (как правило, способом центробежной сепарации) воды и твердых частиц. Кроме того, в топливе не должно содержаться смазочного масла, механических загрязнений или химических отходов, отрицательно сказывающихся на работоспособности двигателя.

Спецификация сырой нефти для Wärtsilä 32

Свойства топлива	Единица измерения	Предельное значение
Вязкость перед ТНВД, мин.	сСт	2
Вязкость перед ТНВД, макс.	сСт	24
Вязкость при 50 °С, макс.	сСт	700
Плотность при 15 °С, макс.	кг/м ³	1010
Содержание воды на входе в дизель, макс.	% от объема	0,3
Содержание серы, макс.	% от массы	4,5
Зольность, макс.	% от массы	0,15
Содержание ванадия, макс.	мг/кг	450
Содержание натрия на входе в дизель, макс.	мг/кг	30
Содержание алюминия + кремния на входе в дизель, макс.	мг/кг	15
Содержание кальция + калия + магния на входе в дизель, макс.	мг/кг	50
Углеродистый остаток, макс.	% от массы	20
Содержание асфальтенов, макс.	% от массы	14
Температура помутнения топлива, макс.	°С	60
Общий осадочный потенциал, макс.	% от массы	0,1
Содержание сероводорода, макс.	мг/кг	5
Предел текучести (верхний), макс.	°С	30
Кислотное число, макс.	мг КОН/г	3

В пресс-релизах, опубликованных в течение последних двух лет на официальном сайте журнала «Турбины и дизели» [2], представлена информация о постройке нескольких дизельных электростанций на базе дизелей Wärtsilä, предназначенных для работы на сырой нефти, добываемой в Аргентине (11.10.2017 г.), Красноярском крае (03.10.2017 г.), Саудовской Аравии (02.09.2017 г.), Ямало-Ненецком автономном округе (26.08.2016 г.). К сожалению, сведения об опыте эксплуатации дизелей компании Wärtsilä на топливной нефти в открытом доступе также отсутствуют.

Опыт и перспективы отечественных двигателестроителей. Современной отечественной разработкой, в которой в качестве топлива предусмотрено использование сырой нефти, добываемой на группе месторождений Центральной части Хорейверского поднятия в Ненецком автономном округе, является электростанция контейнерного типа, изготовленная на АО «ЗВЕЗДА-ЭНЕРГЕТИКА». По заказу АО «Зарубежнефть» разрабатывается и готовится к производству электростанция контейнерного типа «ЗВЕЗДА-3Н-1650 ВК-05 МЗ/НП» для длительной эксплуатации на нефти 3-го класса (ГОСТ Р 51858-2002), имеющейся на пункте сдачи-приемки нефти «Мусюршор» ООО «СК «Русвьетпетро»» (рис. 1).

Как показано на рис. 1, энергетическое оборудование и коммуникации в условиях вечной мерзлоты располагаются на свайном фундаменте на расстоянии не менее 1,5 м от поверхности грунта. Это техническое решение необходимо в целях предотвращения проседания контейнеров вследствие подтопления от выделяющейся при работе дизель-генераторов теплоты.



Рис. 1. Энергоцентр пункта сдачи-приемки нефти «Мусюршор»

Газонефтяной дизель-генератор 12 НДГ, применяемый в разрабатываемой электростанции, проектируется на базе дизеля 12 ГДЧН 26/26 семейства Д49 ОАО «Коломенский завод» (рис. 2) и имеет следующие основные характеристики и показатели:

- количество и расположение цилиндров — 12, V-образное;
- диаметр цилиндра и ход поршня — 260 и 260 мм;
- система наддува — один газотурбокомпрессор с промежуточным охлаждением наддувочного воздуха;
- частота вращения коленчатого вала — 1000 мин⁻¹;
- номинальная мощность — 1650 кВт;
- удельный эффективный расход топлива на дизельном (нефтяном) цикле при номинальной мощности 0,222 (0,224) кг/(кВт×ч) и низшей теплоте сгорания топлива 42700 кДж/кг.



Рис. 2. Газонефтяной дизель 12 ГДЧН 26/26 семейства Д49

Как видно из рис. 2, свободное пространство в контейнере весьма ограничено, что создает явные трудности для технического обслуживания и текущего ремонта дизель-генератора. Использование грузоподъемных устройств для демонтажа основных деталей и узлов при среднем ремонте возможно только при демонтаже наружных панелей обшивки контейнера в летнее время года. Указанные обстоятельства обуславливают высокие требования к надежности и безотказности оборудования.

Разработанный специалистами АО «ЗВЕЗДА-ЭНЕРГЕТИКА» [5] и ООО «Конвер» [6] комплекс мероприятий для подготовки топливной нефти позволяет существенно снизить негативное проявление указанных выше проблем при использовании этого вида топлива. Установка подготовки нефти конструктивно реализована в отдельном контейнере (рис. 3 и 4). Как видно из рис. 3, контейнер, в котором находится установка подготовки нефти, нет необходимости располагать на свайном фундаменте ввиду отсутствия существенных источников теплоты. Из рис. 4 видно, что пространства внутри контейнера вполне достаточно для технического обслуживания и ремонта агрегатов установки. Кроме того, крупногабаритные агрегаты, для разборки и демонтажа которых необходимы грузоподъемные устройства, отсутствуют. Таким образом, проблемы, изложенные при рассмотрении рис. 1 и 2, в данном случае неактуальны.



Рис. 3. Установка подготовки нефти, размещенная в контейнере

При создании автоматизированной электростанции, работающей на топливной нефти, возникает еще одна важная проблема — кристаллизация парафиновых углеводородов. Выпадающие в осадок парафины могут откладываться на поверхностях деталей топливной системы и забивать фильтры тонкой очистки топлива. Это вызовет нарушение подачи топлива к топливной аппаратуре. Известно, что внезапный отказ при работе двигателя на топливной нефти особенно чреват тем, что для восстановления его работоспособности может потребоваться полная переборка топливной системы (в том числе топливной аппаратуры) для ее очистки и промывки.

Как известно, парафиновые углеводороды (общая структурная формула C_nH_{2n+2}) представляют собой цепные органические соединения, в которых открытые некольцевые цепи атомов углерода полностью насыщены атомами водорода. Они являются ценнейшими компонентами топлива для дизелей, поскольку оказывают положительное влияние на воспламеняемость. Поэтому исследовать возможность применения методов их удаления из топливной нефти вряд ли целесоо-

бразно. Тем не менее необходимо выполнить обоснование технических решений, способствующих предотвращению кристаллизации парафинов в процессе эксплуатации двигателя на топливной нефти. При этом следует напомнить, что режимы пуска, остановки и предостановочной промывки топливной аппаратуры осуществляются на дизельном топливе, а режимы основной работы — на подготовленной (очищенной и подогретой) топливной нефти.



Рис. 4. Размещение механизмов в контейнере установки подготовки нефти

Высокопарафинистые нефти Колвинского месторождения с содержанием парафинов до 9 % имеют температуру насыщения парафинами 36,2 °С и температуру потери текучести 21,1 °С [7], [8]. Необходимо также учитывать, что нефть, добываемая, например, на месторождениях ООО «СК «РУСВЬЕТПЕТРО»» содержит 5 ... 6 % парафинов, температура её плавления (температура кристаллизации) составляет 76 ... 77 °С [9]. Результаты исследований приведены для одной пробы нефти, отобранной на пункте сдачи-приемки нефти «Мусюршор». Между тем известно, что добываемая даже из одного месторождения нефть весьма неоднородна по химическому составу. Следовательно, фактические показатели в условиях эксплуатации могут существенно отличаться от представленных. По этой причине для предотвращения выпадения парафинов на режиме основной работы температуру нефти следует установить не менее 80 °С.

Описываемая проблема выпадения кристаллов парафина может возникать в период переключения работы двигателя с дизельного топлива на нефть. Это объясняется тем, что подаваемое в процессе переключения дизельное топливо имеет низкую температуру. Поэтому температура образующейся в период переключения смеси дизельного топлива и нефти может оказаться ниже температуры кристаллизации парафинов, что, как указано выше, вызывает их выпадение и осаждение в фильтрах. В качестве основной меры предотвращения указанного выпадения парафинов разработчикам электростанции в перспективе следует рассмотреть предварительный подогрев

дизельного топлива, осуществляемый в процессе переключения питания двигателя с дизельного топлива на нефть. В качестве дополнительной меры может быть использовано применение депрессорных присадок для улучшения низкотемпературных свойств нефти. Депрессорные присадки не препятствуют кристаллизации парафинов, но существенно снижают температуру кристаллизации [10].

Большинство исследователей высказывают мнение о том, что депрессорные присадки выступают в качестве модификаторов структуры, уменьшая размеры образующихся кристаллов [11]. Известные отечественные и зарубежные нефтяные депрессорные присадки и ингибиторы парафиновых отложений предназначены главным образом для нефтепромыслового оборудования [12]. Публикации результатов действия этих присадок применительно к топливной нефти для дизельных двигателей не обнаружены. Важной информацией является влияние концентрации присадки на цетановое число и температуру вспышки, а также на вязкость, температуру застывания и предельную температуру фильтруемости топливной нефти.

Анализ физических явлений, которые сопутствуют улучшению реологических свойств нефти при применении депрессорных присадок, представлен в работе [13]. Выбор присадок для нефти связан в основном с учетом ее химического состава. Априори оценить эффект от их использования невозможно. Поэтому решение о целесообразности применения той или иной присадки для нефтяной электростанции необходимо проверять результатами эксплуатации. Следует отметить, что в рассматриваемом случае присадку для нефти изначально следует добавлять не в топливную нефть, а в дизельное топливо. Это объясняется, в частности, тем, что в процентном выражении доля используемого дизельного топлива по сравнению с долей нефти мала. Следовательно, потребуется соответствующее малое количество присадок. Предлагаемое техническое решение может явиться дополнительной мерой для предотвращения кристаллизации парафина в высокопарафинистой топливной нефти при ее смешении с возможно несколько более холодным дизельным топливом. Для реализации указанного решения расходный бак дизельного топлива необходимо оборудовать дозирующим устройством.

Заключение (Conclusion)

Обеспечение дешевой электроэнергией отечественных нефтепромыслов, удаленных на тысячи километров от нефтеперерабатывающих заводов, является важной народнохозяйственной задачей, которая стимулирует, в частности, научно-исследовательские и опытно-конструкторские работы отечественных двигателестроителей.

Как показывает практика, описанные проблемы перевода дизельного двигателя на нефтяное топливо постепенно преодолеваются, однако еще существует ряд нерешенных вопросов. Один из них состоит в предотвращении и преодолении негативных последствий выпадения парафинов из нефтяного топлива в процессе обязательного регулярного перевода питания двигателя с дизельного топлива на нефть. Выпадающие в осадок парафины могут откладываться на поверхностях деталей топливной системы двигателя и забивать фильтры тонкой очистки топлива. Это приводит к нарушению подачи топлива к топливной аппаратуре, которое вызывает нарушение нормальной работы двигателя, вплоть до его остановки.

Авторами предложены и обоснованы принципиальные решения указанного вопроса, которые заключаются в предварительном подогреве дизельного топлива, а также использовании депрессорных присадок, улучшающих низкотемпературные свойства нефти.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Официальный сайт компании «MAN Diesel & Turbo» [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <http://www.dieselturbo-russia.man.eu> (дата обращения: 10.10.2017).
2. Официальный сайт специализированного информационно-технического журнала «Турбины и дизели» [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <http://www.turbine-diesel.ru> (дата обращения: 01.11.2017).

3. Капралов Д. А. Мини-ТЭС на сырой нефти в Красноярском крае: специализированный информационно-технический журнал / Д. А. Капралов // Турбины и дизели. — 2009. — Январь-февраль. — С. 2–5.
4. Проектное руководство Wärtsilä 32. — Wärtsilä Finland OY: Wärtsilä Corporation, 2015. — 309 p.
5. Официальный сайт АО «ЗВЕЗДА-ЭНЕРГЕТИКА» [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <http://www.energostar.com> (дата обращения: 15.10.2017).
6. Официальный сайт ООО «Конвер» [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <http://www.konver.ru> (дата обращения: 15.10.2017).
7. Шадрина П. Н. Совершенствование технологии борьбы с асфальтосмолопарафиновыми отложениями на нефтепромысловом оборудовании месторождений высоковязкой нефти: дис. ... канд. техн. наук / П. Н. Шадрина. — Уфа: Уфимский государственный нефтяной технический университет, 2017. — 145 с.
8. Требин Г. Ф. Нефти месторождений Советского Союза: Справочник / Г. Ф. Требин, Н. В. Чарыгин, Т. М. Обухова. — М.: Недра, 1980. — 583 с.
9. Толоконский С. И. Физико-химические исследования образца нефти с ПСП «Мусюршор». Отчет АО «ВНИИнефть» о выполнении работ по договору №217/01-027/17 от 28.07.17 г. / С. И. Толоконский [и др.]. — 8 с.
10. Чен В. Влияние депрессорных присадок на температуру застывания парафинов / В. Чен, Ж. Жао, С. Юин // Fuel. — 2010. — Выпуск 89. — С. 1127–1132.
11. Fremel' T.V. On the mechanism of the action of depressing agents / T. V. Fremel', M. A. Zubova, M. E. Yunovich, T. N. Mitusova // Chemistry and Technology of Fuels and Oils. — 1993. — № 8. — С. 36–37.
12. Иванова Л. В. Регулирование низкотемпературных свойств нефтяных систем разного уровня сложности: дис. ... д-ра хим. наук / Л. В. Иванова. — М.: РГУ нефти и газа имени И.М. Губкина, 2016. — 323 с.
13. Ислямов И. Ш. Использование полимерных присадок / И. Ш. Ислямов // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Геология. Нефтегазовое и горное дело. — 2012. — Т. 11. — № 2. — С. 123–130.

REFERENCES

1. The official website of the company «MAN Diesel & Turbo». Web. 10 Oct. 2017 <<http://www.dieselturbo-russia.man.eu>>.
2. Official site specialized information technology magazine “Turbines and diesel engines”. Web. 1 Nov. 2017 <<http://www.turbine-diesel.ru>>.
3. Kapralov, D. A. “CHP plant on crude oil operating in Krasnoyarsk Territory.” *Turbines & Diesels* January-February (2009): 2–5.
4. *Proektnoe rukovodstvo Wartsila 32*. Wärtsilä Finland OY: Wärtsilä Corporation, 2015.
5. The official website of ZVEZDA-ENERGETIKA, JSC. Web. 15 Oct. 2017 <<http://www.energostar.com>>.
6. The official website of LTD “Konver”. Web. 15 Oct. 2017 <<http://www.konver.ru>>.
7. Shadrina, P. N. Sovershenstvovanie tekhnologii bor'by s asfal'tosmoloparafinovymi otlozheniyami na neftepromyslovom oborudovanii mestorozhdenii vysokovyazkoi nefiti. PhD diss. Ufa: Ufimskii gosudarstvennyi neftyanoi tekhnicheskii universitet, 2017.
8. Trebin, G. F., N. V. Charygin, and T.M. Obukhova. *Nefti mestorozhdenii Sovetskogo Soyuz: Spravochnik*. M.: Nedra, 1980.
9. Tolokonskii, S. I., et al. *Fiziko-khimicheskie issledovaniya obraztsa nefiti s PSP «Musyurshor»: otchet AO «VNIIneft'» o vypolnenii rabot po dogovoru №217/01-027/17 ot 28.07.17 g.*
10. Chen, V., Zh. Zhao, and S. Yuin. “Vliyanie depressornykh prisadok na temperaturu zastyvaniya parafinov.” *Fuel* 89 (2010): 1127–1132.
11. Fremel', T. V., M. A. Zubova, M. E. Yunovich, and T. N. Mitusova. “On the mechanism of the action of depressing agents.” *Chemistry and Technology of Fuels and Oils* 8 (1993): 36–37.
12. Ivanova, L. V. *Regulirovanie nizkotemperaturnykh svoystv neftyanykh sistem raznogo urovnya slozhnosti*. Dr. diss. M.: RGU nefiti i gaza imeni I.M. Gubkina, 2016.
13. Islyamov, Iljas. “Use of polymer additives.” *Perm Journal of Petroleum and Mining Engineering* 11.2 (2012): 123–130.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Столяров Сергей Павлович —
кандидат технических наук, доцент
ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский
государственный морской технический
университет»

190121, Российская Федерация,
г. Санкт-Петербург, ул. Лоцманская, 3
e-mail: stsp56@yandex.ru

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

198035, Российская Федерация,
г. Санкт-Петербург, ул. Двинская, 5/7
e-mail: gavrilov@vg5647.spb.edu,
kaf_sdvs@gumrf.ru

Машенко Владимир Юрьевич —
кандидат технических наук, доцент
ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский
государственный морской технический
университет»

190121, Российская Федерация,
г. Санкт-Петербург, ул. Лоцманская, 3
e-mail: masvladimir@yandex.ru

IFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Stolyarov, Sergey P. —
PhD, associate professor
Saint-Petersburg marine technical
University

3 Lotsmanskaya Str.,
St. Petersburg, 190121,
Russian Federation
e-mail: stsp56@yandex.ru

Gavrilov, Vladimir V. —
Dr. of Technical Sciences, professor
Admiral Makarov State University
of Maritime and Inland Shipping
5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg,
198035, Russian Federation
e-mail: gavrilov@vg5647.spb.edu,
kaf_sdvs@gumrf.ru

Mashchenko, Vladimir Yu. —
PhD, associate professor
Saint-Petersburg marine technical
University

3 Lotsmanskaya Str.,
St. Petersburg, 190121,
Russian Federation
e-mail: masvladimir@yandex.ru

Статья поступила в редакцию 19 июня 2018 г.

Received: June 19, 2018.

DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-4-793-803

ANALYSIS OF THE METHODS FOR REDUCING THE SULPHUR CONTENTS IN THE EXHAUST GASES OF SHIP'S ENGINES

P. A. Pyae

Saint-Petersburg State Marine Technical University,
St. Petersburg, Russian Federation

In 2020, the International Maritime Organization (IMO) plans to introduce a new environmental standard, called IMO Tier III. According to the future norm, the maximum permissible sulfur concentration in the exhaust gases of ship's engines for the whole world will be 0.5%, and for the emission control areas - 0.1%. There will be difficulties in sea transportation to implement this norm, as heavy fuel is used in transport vessels for the works of power plants today, and such fuel does not meet the IMO Tier 3 requirement. This problem is acute for oil tankers, because they are fueled is spent not only for traffic, but also for heating the transported cargo - approximately in equal proportions. The paper suggests ways to solve the problem with fuel for ships, especially for tankers, in order to meet the requirements of IMO Tier 3. No method is absolutely preferable. To achieve the goal set in this paper, a review and analysis of all the existing methods of solving the problem is carried out. Comparison of different types of fuel as an alternative for use on ships is performed. The use of traditional fuels with the use of additional equipment (scrubbers) is analyzed. Presented are the prospects of using a two-stage waste heat boiler, which provides a reduction in fuel consumption of up to 7% in oil tankers. Options are subject to analysis on environmental and economic indicators in order to find the best way to solve the problem presented.

Keywords: International Maritime Organization (IMO), IMO Tier3, fuel for marine power plants, scrubber, marine gas engines, auxiliary boiler plant, two-staged exhaust gas boiler.

For citation:

Pyae, Phyo Aung. "Analysis of the methods for reducing the sulphur contents in the exhaust gases of ship's engines." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 10.4 (2018): 793–803. DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-4-793-803.

УДК 629.12.03.001.63

АНАЛИЗ СПОСОБОВ СНИЖЕНИЯ СОДЕРЖАНИЯ СОЕДИНЕНИЙ СЕРЫ В ВЫПУСКНЫХ ГАЗАХ СУДОВЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

П.А. Пьяе

Санкт-Петербургский государственный морской технический университет,
Санкт-Петербург, Российская Федерация

В 2020 г. Международная морская организация (ИМО) планирует ввести в действие новую экологическую норму, именуемую ИМО Tier III. Согласно будущей норме, максимально допустимая концентрация серы в отработанных газов судовых двигателей для всего мира будет составлять 0,5%, а для районов контроля выбросов — 0,1 %. В морских перевозках возникнут трудности для внедрения этой нормы, так как в сегодняшнее время в транспортных судах для работы СЭУ широко используется тяжелое топливо мазут, которое не обеспечивает требование ИМО Tier III. Данная проблема особенно актуальна для нефтеналивных судов, поскольку на них топливо расходуется не только для движения, но и для подогрева перевозимого груза (приблизительно в равной пропорции). В работе предлагаются способы решения проблемы с топливом для судов, особенно для танкеров, с целью обеспечения требованиям ИМО Tier III. Ни один способ не является абсолютно предпочтительным. Для достижения цели, поставленной в данной работе, производится обзор и анализ всех существующих способов решения проблемы. Выполнено сравнение различных видов топлива в качестве альтернативы для использования на судах. Анализируется использование традиционных топлив с применением дополнительного оборудования (скрубберы). Рассмотрены перспективы применения двухступенчатого утилизационного котла, обеспечивающего снижение расхода топлива до 7 % на нефтеналивных судах. Варианты подлежат анализу по экологическим и экономическим показателями с целью поиска оптимального способа решения представленной задачи.

Ключевые слова: Международная морская организация (ИМО), ИМО Tier III, топливо для судовых энергетических установок, скруббер, судовые установки на газовом топливе, вспомогательная котельная установка, двухступенчатый утилизационный котел.

Для цитирования:

Пьяе П. А. Анализ способов снижения содержания соединений серы в выпускных газах судовых двигателей / П. А. Пьяе // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2018. — Т. 10. — № 4. — С. 793–803. DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-4-793-803.

Введение (Introduction)

Судовые энергетические установки (СЭУ) работают как на тяжелом топливе (мазут), так и на легком (дизельном) топливе и при этом загрязняют атмосферу, выбрасывая отработавшие газы, содержащие окислы серы SO_x, азота NO_x, углерода CO₂ и твердые частицы. Международная морская организация (ИМО) регламентирует правила для предотвращения загрязнения окружающей среды с судов, устанавливая все более строгие экологические требования к СЭУ [1].

На рис. 1 представлено требование к содержанию серы в топливе. Как видно из этого рисунка, в 2020 г. вступит в силу новый экологический норматив, именуемый ИМО Tier III, согласно которому количество серы в топливе судовых двигателей 1 не должно превышать 0,5 % для открытого моря и 0,1 % для специальных районов контроля выбросов 2 [2] – [3].

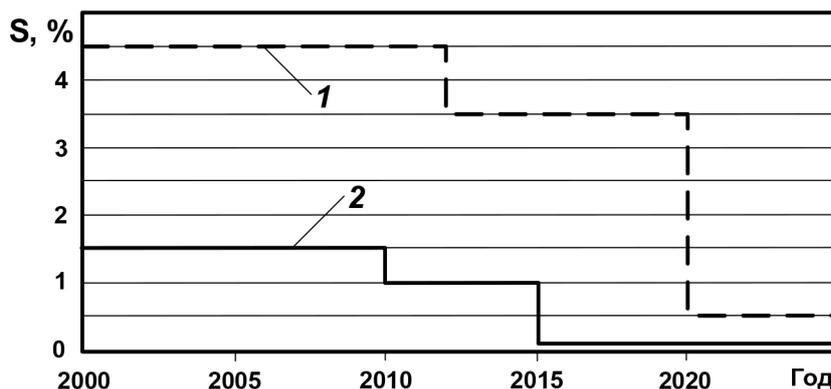


Рис. 1. Ограничения ИМО содержания серы в топливе

В настоящее время на морских транспортных судах используется тяжелое топливо — мазут (М-40, М-100) из-за его низкой цены. Количество серы в таком топливе составляет около 3,5 % [4]. Очевидно, что существующая система работы СЭУ не удовлетворяет требованиям ИМО Tier III. Особенно актуальна эта проблема для танкеров, расходующих за рейс вдвое большее количество топлива вследствие работы вспомогательных котлов, обеспечивающих подогрев перевозимого груза — тяжелых нефтепродуктов и парафинистой нефти. Необходимо выполнить анализ методов для приведения экологичности судовых энергетических установок в соответствие с требованиями стандарта ИМО Tier III. Таким образом, задачей данной статьи является:

- 1) обзор способов снижения содержания серы в отработанных газах судовых энергетических установок с ДВС;
- 2) сравнительный анализ характеристик способов и разработка методики выбора оптимального варианта с целью его соответствия перспективным экологическим и экономическим требованиям.

Методы и материалы (Methods and Materials)

В настоящее время в технической литературе рассматриваются следующие основные способы снижения содержания серы в отработавших газах СЭУ:

1. Использование традиционных видов топлива и применение дополнительного оборудования (скруббер) для нейтрализации и очистки отработанных газов.

2. Использование альтернативных видов топлива (метанол, диметилэфир, водотопливная эмульсия, марингазойл, пропан и бутан, природный газ), соответствующих стандарту ИМО Tier III.

3. Применение двухступенчатых котлов, позволяющих снизить расход топлива на танкерах приблизительно вдвое. Меньше сжигается топлива, меньше выпускных газов и меньше серы поступает в окружающую среду.

Следует отметить, что ни один из вышеуказанных способов не является абсолютно предпочтительным. У каждого из них есть свои недостатки и достоинства. Необходимо выполнить сравнительный анализ каждого способа и сделать выбор оптимального варианта для модернизация СЭУ в соответствии с требованиями ИМО Tier III.

Результаты (Results)

1. Система нейтрализации отработанных газов с использованием скруббера.

Используется очистительная технология для продуктов сжигания высокосернистого топлива для уменьшения выбросов окислов серы в атмосферу. Разработаны скрубберы для очистки выхлопных газов от серы и диоксидов азота. Скрубберы позволяют уменьшать SOx до 90 %, NOx до 10 % и твердые частицы до 60 – 90 % от исходного содержания в выхлопных газах [5]. На судах распространено использование мокрых скрубберов, в которых для нейтрализации отработанных газов в качестве очищающей среды применяются либо морская вода, либо пресная с добавлением раствора щелочи (NaOH) [6]. На рис. 2 представлена принципиальная схема работы скруббера.

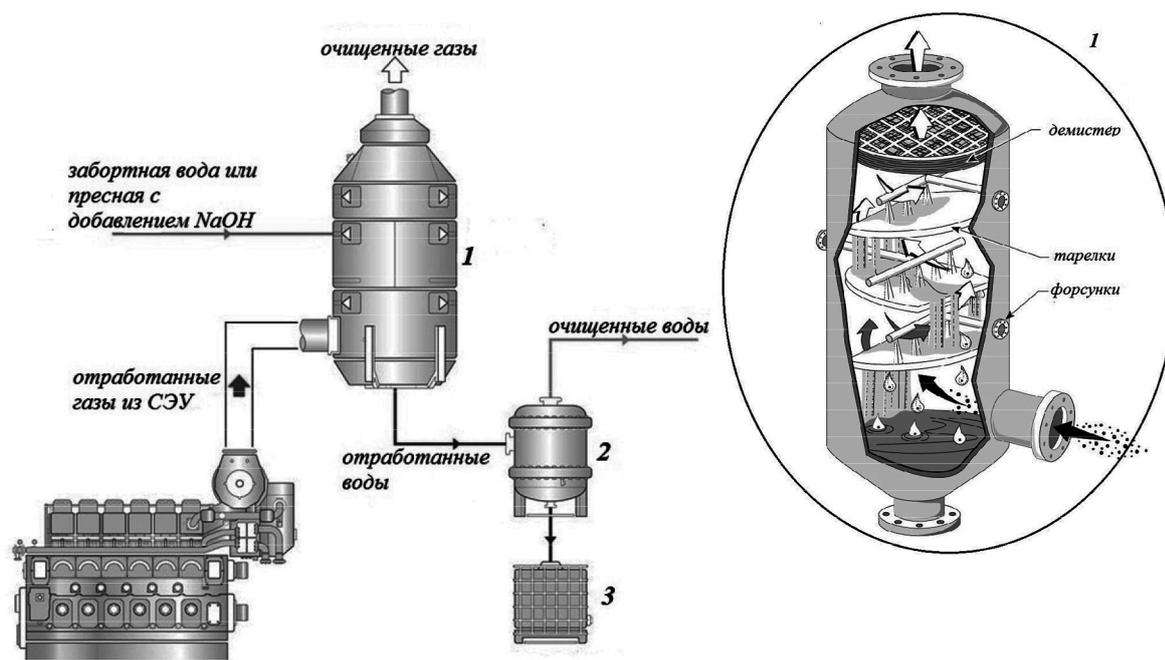


Рис. 2. Принципиальная схема работы скруббера:

1 — корпус очистки газов; 2 — блок очистки отработанных вод; 3 — шламовый танк

Система очистки отработанных газов из СЭУ выполняется в корпусе скруббера 1, который обычно состоит из следующих основных элементов: форсунки для распыления воды в корпусе скруббера, дырчатые тарелки для образования пены на этих поверхностях, демистер для отделения жидкости от уходящих газов на выходе скруббера. Выхлопные газы из СЭУ входят через входной трубопровод в нижнюю часть скруббера. В корпусе скруббера газы промываются очищающей водой. Очищающая вода под давлением подается в корпус скруббера. Форсунки, установленные в корпусе скруббера, обеспечивают хорошее распыление воды. Капли очищающей воды и газы

смешиваются, попадая далее на дырчатые тарелки. На этих тарелках смеси преобразуются в пену и одновременно происходит процесс отделения вредных выбросов газа в соответствии с химической реакцией. Через дырчатые тарелки очищенные газы поднимаются вверх и уходят в атмосферу через демистер, размещенный в верхней части скруббера. На демистере жидкости отделяются от газов и в атмосферу уходят только сухие чистые газы. Отработанные воды с шламом собираются в нижней части скруббера и затем отводятся из его корпуса, направляясь в блок очистки 2, где шлам отделяется от отработанных вод. Шлам сохраняется в танке 3, а очищенные воды циркулируют для повторного использования.

В зависимости от уровня щелочности воды в районах эксплуатации судов используют различные системы нейтрализации отработавших газов [7], а именно: скруббер с замкнутым циклом на пресной воде и дополнительном раствором NaOH, скруббер с открытым циклом на морской воде, скруббер с гибридным циклом.

При применении дополнительных систем СЭУ для нейтрализации отработавших газов с использованием скрубберов можно использовать традиционный дешевый высокосернистый мазут для работы СЭУ. В этом случае инфраструктура бункеровки судов не нуждается в изменении, однако большой вес и объем скруббера, необходимость цистерны для сбора и хранения результатов очистки, а также необходимость выброса отработанного раствора солей за борт являются главными недостатками применения системы нейтрализации отработавших газов с использованием скрубберов [5].

2. Использование в качестве моторного топлива альтернативных видов топлива, соответствующих стандарту IMO Tier III.

Метанол.

Использование в качестве моторного топлива метанола CH_3OH отвечает экологическим требованиям IMO Tier III. Метанол потенциально дешевле традиционных видов топлива, а также более распространён. Однако при этом имеются некоторые недостатки. Основным недостатком использования метанола в качестве моторного топлива СЭУ является его более низкая температура вспышки (8°C) и более короткое время сгорания. Это не только связано с его взрывоопасностью [8], но и способствует увеличению содержания NOx. Кроме того, до сих пор использование метанола для работы СЭУ находится только на стадии испытаний. В мировой практике отсутствует опыт эксплуатации судов, работающих на метаноле.

Диметилэфир (ДМЭ).

Основным достоинством применения ДМЭ $\text{C}_2\text{H}_6\text{O}$ в качестве топлива СЭУ является его высокая экологичность [9]. Однако теплота сгорания ДМЭ ниже аналогичного показателя традиционного дизельного топлива в 1,6 раза и такое топливо потенциально 1,5 раза дороже традиционного дизельного топлива. Из-за низкой температуры вспышки, применение данного топлива возможно только в виде добавок. Максимально возможная концентрация ДМЭ в дизельном топливе по этой причине составляет 0,7 %.

Водотопливная эмульсия (ВТЭ).

В результате проведенных опытов использования ВТЭ в двигателях внутреннего сгорания различного назначения и котельных установках определен состав трехкомпонентной водотопливной эмульсии, отвечающий следующим требованиям: дизельное топливо — 37,5 %, мазут Ф-5 — 32,5 %, вода — 30 %. Использование ВТЭ обеспечивает экономию топлива около 3 % при значительном улучшении экологических характеристик продуктов сгорания и снижении нагарообразования [10]. Однако следует отметить, что при применении ВТЭ в качестве моторного топлива не обеспечивается соблюдение требований IMO Tier III. При использовании ВТЭ содержание серы в отработанных газах будет находиться на уровне чистого дизельного топлива [11].

Малосернистое дизельное топлива (марингазойль — MGO).

Основным достоинством применения MGO в качестве топлива СЭУ является отсутствие требования в дополнительных системах СЭУ. Не требуется также модернизация систем существующей энергетической установки. Недостаток применения MGO в качестве топлива СЭУ состо-

ит в том, что только некоторые нефтеперерабатывающие заводы Российской Федерации способны производить данный вид топлива [12] и, следовательно, его стоимость чрезвычайно высока по сравнению с другими видами топлива — приблизительно 850 – 900 долл. за тонну [13].

Пропан и бутан.

Проводя многочисленные испытания, следует отметить, что применение такого газового топлива, как метан, пропан и бутан в качестве моторного топлива для работы СЭУ обеспечивает соответствие требованиям ИМО Tier III [14]. Пропан и бутан — это углеводородные газы и их можно найти в сочетании с другими углеводородами. Газы пропан (C_3H_8) и бутан (C_4H_{10}) получают при переработке природного газа и нефти. Пропан и бутан — это побочные продукты сжижения природного газа и почти 60 % от всего количества пропана получается в результате переработки необработанного природного газа. Остальные 40 % извлекают при перегонке сырой нефти.

Основными достоинствами применения пропана и бутана в качестве моторного топлива СЭУ являются их компоненты, которые обеспечивают не только уменьшение вредных выбросов выхлопных газов, но и увеличенную смазку и срок службы двигателя; они могут быть сжижены при умеренном давлении и нормальной температуре [15], [16] (температура кипения пропана — $-42\text{ }^\circ\text{C}$ и бутана — $-1\text{ }^\circ\text{C}$). Пропан и бутан легко хранятся в емкостях под умеренным давлением благодаря своей простоте и безопасности, при этом упрощается бункеровка судов и облегчается хранение топлива в запасных танках.

Существенными недостатками применения пропана и бутана в качестве топлива СЭУ являются: высокая стоимость по сравнению с другими альтернативными топливами (приблизительно 700 – 800 долл./т); топливную систему и систему хранения таких газов необходимо модернизировать, и следовательно, возрастает стоимость переоборудования систем СЭУ; в настоящее время снабжение пропаном и бутаном в портах не распространено.

Сжиженный природный газ (СПГ).

Применение СПГ для работы СЭУ является одним из перспективных способов снижения вредных выбросов в соответствии с требованиями ИМО Tier III. Использование СПГ в качестве моторного топлива СЭУ позволяет полностью исключить выбросы серы, сократить выбросы оксидов азота на 90 % и снизить выбросы диоксида углерода на 30 %, а также сократить выброс твердых частиц. Основным компонентом СПГ является метан (CH_4). Фирмы-производители двигателей MANB&W, Wärtsilä изготавливают двухтопливные судовые двигатели, в состав моторного топлива которых входят СПГ (90 – 99 %) и дизельное топливо (1 – 10 %) как запальное [17]. Дополнительным достоинством при переводе СЭУ на СПГ является его меньшая стоимость по сравнению с другими альтернативными видами топлива — около 400 долл./т [13]. Кроме того, использование СПГ в России обеспечит получение еще большей прибыли, так как внутренняя цена на газ в России в 3,2 раза меньше, чем его цена на Европейском рынке. Однако при этом имеются и явные недостатки: необходимость создания более сложной инфраструктуры, обеспечивающей снабжение потребителей, — отсутствие развитой системы бункеровки судов СПГ и высокие требования законодательства Российской Федерации к местам расположения емкостей хранения СПГ.

При переводе СЭУ на газовое топливо необходимо модернизировать систему хранения запаса топлива и снабжения. На рис. 3 представлена схема снабжения газовым топливом для работы СЭУ на судне. На судне требуются специальные запасные танки хранения СПГ [18], обеспечивающие мощную тепловую защиту от воздействия внешней среды. В таких запасных танках СПГ наливается и сохраняется в виде криогенной жидкости при температуре $-162\text{ }^\circ\text{C}$. При этом следует отметить, что такие танки не могут полностью защитить повышению температуры СПГ из-за воздействия внешней среды. Следовательно, криогенные жидкости СПГ от 0,15 % до 0,18 % от вместимости танков в сутки преобразуются в газообразную фазу [19]. Образующиеся газы постоянно откачиваются и далее через компрессор низкого давления (0,4 – 0,7 МПа) направляются к газовым двигателям. В случае, если потребляемый расход газа для двигателей становится меньше, чем расход образующегося в танках газа, то необходимо сохранить избыточные газы в резервуарах высо-

кого давления (25 МПа). Значит, на судне нужно установить резервуары с необходимым объемом. В противном случае, если количества образующегося в танках газа недостаточно для обеспечения расхода газовых двигателей, на судне требуется регазификатор для преобразования СПГ в газообразную фазу. Кроме того, СПГ взрывоопасен, поэтому при его использовании, во избежание протечки, требуется надежная процедура передачи топлива к СЭУ. По этой причине в топливной системе необходимо использовать трубопроводы с двойной стеной. Таким образом, поскольку система использования и хранения СПГ является сложной, стоимость переоборудования судовых силовых установок на СПГ значительно возрастает.

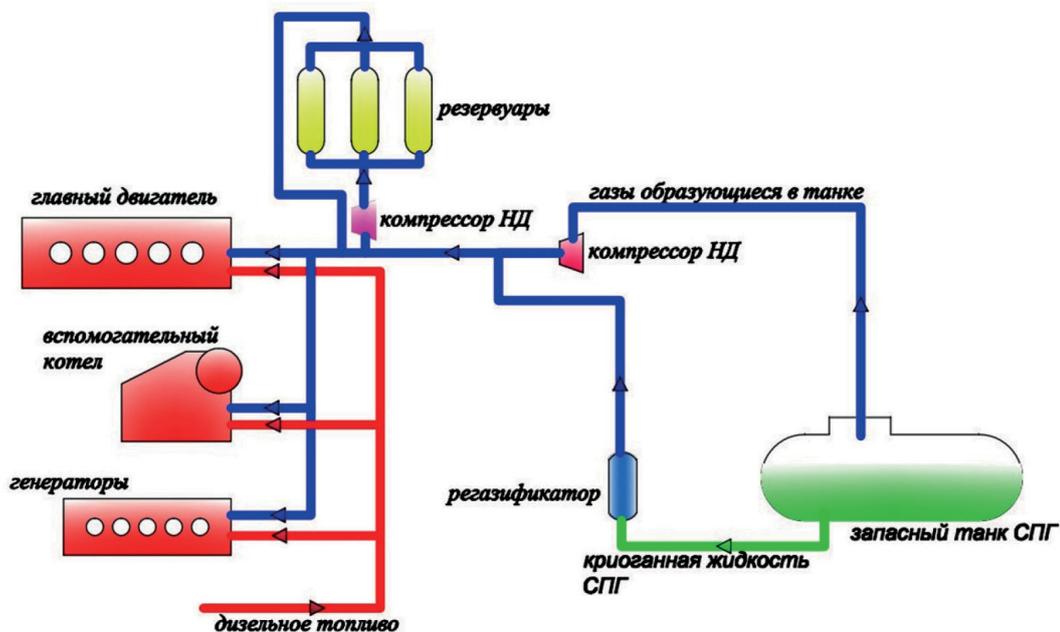


Рис. 3. Схема снабжения газовым топливом для работы СЭУ

В табл. 1 представлены сравнительные характеристики СПГ и стандартного дизельного топлива. Как видно из таблицы, исходя из умножения низшей теплоты сгорания и плотности, можно отметить, что за единицу измерения энергии (джоуль), затрачиваемой двигателем в танках запаса топлива, необходимо иметь СПГ большего объема, чем традиционного дизельного топлива. Значит, при переводе СЭУ на газовое топливо СПГ из традиционного дизельного суммарный объем танков запаса топлива увеличивается приблизительно в 1,8 раза. Так как определяющим фактором является грузовместимость, эффективность перевозок грузов будет снижена.

Таблица 1

Характеристики сжиженного природного газа и дизельного топлива

Сравнительные характеристики	СПГ (в жидком состоянии)	ДТ
Низшая теплота сгорания, кДж/кг	50300	42700
Плотность, кг/м ³	400	863

Тем не менее, по мнению ряда специалистов, при подготовке к введению стандарта ИМО Tier III в 2020 г. из ранее указанных альтернативных видов топлива применение СПГ в качестве моторного является наиболее перспективным видом топлива.

3. Применение двухступенчатых утилизационных котлов.

Для судов, особенно для танкеров, если у них продолжается использование тяжелого топлива с применением скрубберов, следует изменить схему вспомогательной котельной установки (ВКУ). В настоящее время применяется объединенная схема ВКУ с использованием традицион-

ного одноступенчатого утилизационного котла. В связи с тем, что при применении объединенной схемы ВКУ вспомогательный и утилизационный котлы работают на общий сепаратор, невозможно глубоко утилизировать теплоту выхлопных газов из СЭУ [20]. Поэтому выхлопные газы с высокой температурой уходят в атмосферу. Возможно, полезно использовать эту теплоту выхлопных газов при переводе объединенной схемы ВКУ танкера на раздельную [21].

Особенностью раздельной схемы ВКУ является работа вспомогательного и утилизационного котла на свои сепараторы. Кроме того, для обеспечения разнотемпературных тепловых потребителей паром танкера, необходимо модернизировать традиционный одноступенчатый утилизационный котел на двухступенчатый [22], обеспечивающий в максимальной степени глубокую утилизацию теплоты выхлопных газов и получение в три раза больше пара от утилизационных устройств. Вследствие получения от двухступенчатого утилизационного котла большого количества пара с разными параметрами, в предлагаемой в статье раздельной схеме вспомогательный котел, работающий на топливе, должен работать только в некоторых режимах эксплуатации танкера (при перевозке тяжелых нефтепродуктов зимой в северных районах).

Основными достоинствами применения на танкерах раздельной схемы ВКУ с использованием двухступенчатого котла являются: способность обеспечить выполнение разнообразных требований к параметрам пара [21] (пар с температурой 180 °С для подогрева тяжелого топлива и пар с температурой 145 °С для обогрева нефтегруза, цистерн, балласта, парового и водяного отопления, кондиционированного воздуха и бытовых потребителей); возможность осуществить глубокую и структурированную утилизацию теплоты выхлопных газов; возможность уменьшить расход топлива и снизить выбросы в окружающую среду углекислого газа, так как вспомогательный котел исключается из работы; обеспечить получение экономического и экологического эффекта.

В табл. 2 представлены результаты сравнения экологической эффективности, получаемой от системы утилизации для танкера-прототипа «Московский проспект» при его эксплуатации на линии 2×6000 миль [23]: в первой графе приведены результаты эффективности, получаемой от объединенной схемы ВКУ с традиционным утилизационным котлом; во второй графе — результаты раздельной схемы ВКУ с ДУК. В анализе сравнения не учитывается эффективность снижения NOx и SOx, поскольку при сжигании топлива во вспомогательных котлах окислы азота не образуются и окислы серы не выбрасываются в окружающую среду из-за применения скрубберов на выходе газохода.

Таблица 2

Эффективность от системы утилизации

Сравнительные получаемых эффективности	Объединенная схема ВКУ	Раздельная схема ВКУ
Экономия топлива за рейс, т	68	143
Снижение выбросов CO ₂ , т	198	450
Снижение выделения теплоты в окружающую среду, МДж	2895	6572

Итак, очевидно, что повышение экологической эффективности танкера при применении раздельной схемы ВКУ зависит от перевода традиционного одноступенчатого утилизационного котла на двухступенчатый. К сожалению, на мировом рынке отсутствуют фирмы, производящие такие котлы. Разработка типоразмерного ряда ДУК становится инновационной задачей для обеспечения мировой потребности танкерного флота. Для решения данной задачи требуется:

1. Разработка универсальной модели проектирования ДУК с параметризацией в функции влияющих факторов.
2. Определение характеристик типоразмерного ряда ДУК для удовлетворения потребностей широкого спектра судов танкерного флота.
3. Предложение отечественной промышленности ограниченной номенклатуры типоразмеров ДУК для обеспечения отечественных танкеров.

Несмотря на то, что идея применения ДУК и разработка их типоразмерного ряда являются совсем новыми, эту задачу можно решить. Так, в работах [24], [25] представлены методики и перспективы по решению данной задачи. Разработана универсальная модель проектирования ДУК с параметризацией в функции влияющих факторов [26]. По показателям эффективности и экономичности ДУК разрабатываются в виде типоразмерного ряда с определенной градацией, связанной со статистическим анализом потребителей — танкеров [27]. На основе результатов исследований представлены результаты экологической и экономической эффективности от разработки типоразмерного ряда ДУК [28].

Очевидно, что цели экологических требований ИМО таковы, что мазут и традиционное дизельное топливо постепенно будут изъяты из использования. Несмотря на то, что применение ДУК не способно уменьшить количество серы в выхлопных газах из СЭУ, можно снизить расход тяжелого топлива, используемого для работы вспомогательного котла. При этом следует отметить, что на танкерах, вследствие их работы, расход топлива для работы ВК приблизительно равен расходу для главного двигателя и следовательно, чем меньше сжигается топлива, тем меньше выпускных газов и меньше серы поступает в окружающую среду.

Выводы (Conclusion)

1. Все рассмотренные в работе способы имеют свои достоинства и недостатки. Каждый способ требует разработки и внедрения инновационных методов. Специалисты, с одной стороны, пытаются разработать более компактные скрубберы [29] для нейтрализации отработанных газов, а с другой — решить проблему бункеровки [30] – [31] и хранения на судне СПГ. В настоящее время стоимость газового топлива почти в 2 раза ниже стоимости традиционного органического топлива.

2. При применении СПГ требуются дополнительные инвестиции для перехода СЭУ на газовое топливо. В случае, если СЭУ продолжает работать на традиционном топливе с использованием системы нейтрализации отработанных газов, необходимо установить скрубберы, при этом строительная стоимость также возрастает. Тем не менее согласно анализу [13], в настоящее время количество судов, на которых применяются скрубберы, почти в три раза больше количества судов, использующих сжиженное газовое топливо. Причем большинство из последних — это суда-газовозы, перевозящие СПГ.

3. Особенностью танкеров для перевозки тяжелых нефтепродуктов является необходимость установки вспомогательных котлов для выработки пара. В их газовыхлопной тракт необходимо встраивать второй скруббер, несмотря на то, что с установкой первого уже существуют проблемы. Применение двухступенчатых утилизационных котлов позволяет уменьшить скруббер вспомогательного котла, что облегчит его размещение в газоходе вспомогательного котла.

4. Применение скрубберов в системах отвода газов от главных двигателей является дополнительным сопротивлением, что может сказаться на мощности двигателей. Однако возможно, что впрыск воды способствует снижению гидравлического сопротивления, и установка скруббера не окажет влияния на характеристики двигателя. Кроме того, при необходимости на выходе скруббера устанавливается вентилятор во избежание падения противодавления двигателей.

5. На основе статистического анализа приведено обоснование параметров и выполнена разработка конструкции типоразмерного ряда ДУК для использования на отечественных судах и поставок на мировой рынок, включающих шесть типоразмеров [32]. Эта проблема заслуживает отдельного рассмотрения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Freestone D.* International union for the conservation of Nature / D. Freestone, K. M. Gjerde, R. Rayfuse, D. V. Zwaag //The International Journal of Marine and Coastal Law. — 2008. Vol. 23. — Is. 2. — Pp. 359–363. DOI: 10.1163/092735208X295882.

2. Environmental product guide. Environmental technologies.—Vaasa:Wärtsilä,2017. — 66 p.
3. Руководство по средствам защиты окружающей среды компании Wärtsilä. — Вааса: Wärtsilä, 2012.— 61 p.
4. *Демидова Н. П.* Основные показатели судового топлива и их основные эксплуатационные свойства / Н. П. Демидова, А. А. Марченко, О. А. Онищенко // Вестник Камчатского государственного технического университета. — 2015. — № 32. — С. 6–11. DOI: 10.17217/2079-0333-2015-32-6-11.
5. Руководство и изделие скруббер (газоочиститель). — Finland: Wärtsilä, 2013. — 98 с.
6. *Zhou J.* Experiment and prediction studies of marine exhaust gas SO₂ and particle removal based on NaOH solution with a U-type scrubber / J. Zhou, S. Zhou, Y. Zhu // Industrial and engineering chemistry research. — 2017. — Vol. 56. — Is. 43. — Pp. 12376–12384. DOI: 10.1021/acs.iecr.7b02397.
7. SOx scrubber technology. — Finland: Wärtsilä, 2017.— 8 p.
8. Methanol as an alternative fuel for vessels. Public final report. — Netherland:Maritime Knowledge Centre, 2017.— 24 p.
9. *Li G.* Dimethyl Ether (DME) - a new alternative fuel for diesel vehicle / G. Li // Advanced materials research journal. — 2010. — Vol. 156–157. — Pp. 1014–1018. DOI:10.4028/www.scientific.net/AMR.156-157.1014.
10. *Malahov A.* Efficiency improvement of ships operation by water-fuel emulsion using / A. Malahov, R. Gudilko, A. Palagin, I. Maslov // Восточно-европейский журнал передовых технологий. — 2016. — Т. 3. — № 8 (81). — С. 48–53. DOI:10.15587/1729-4061.2016.72544.
11. *Шагеев М. Ф.* Использование водотопливной эмульсии как метод энергосбережения и повышения экологической безопасности энергетических предприятий / М. Ф. Шагеев, Э. М. Хайриева // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока.— 2011. — № 1. — С. 174–176.
12. *Kuimov D. N.* Low-sulfur fuel and oil production / D. N. Kuimov, M. S. Minkin, A. D. Lukyanov // The collection of the papers of material science forum. — 2016. — Vol. 870. — Pp. 671–676. DOI: 10.4028/www.scientific.net/MSF.870.671.
13. *Eelco D. B.* Scrubber – An economic and ecological assessment / D. B. Eelco, H. Maarten. — Delft: NABU, 2015. — 45 p.
14. LPG for marine engines. The marine alternative fuel. — France: WLPGA, 2017. — 142 p.
15. Guide to LPG Use in waterborne vessels.— France: WLPGA, 2017. — 34 p.
16. *Sveinbjorn K.* A Feasibility Study on Propane and Butane as Marine Fuel: master thesis/K. Sveinbjorn. — Sweden.: Chalmers University of Technology, 2011.— 48 p.
17. *Кристен К.* ИМО Tier 3: газовые и двухтопливные двигатели — экологически чистое и эффективное решение (материалы конгресса СИМАС 2013) / К. Кристен, Д. Бранд // Двигателестроение. — 2013. — № 4. — С. 42–56.
18. *Han S.* Structural risk analysis of an NO96 membrane-type liquefied natural gas carrier in Baltic ice operation / S. Han, J. Y. Lee, Y. I. Park, J. Che // Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part M: Journal of Engineering for the Maritime Environment. — 2008. — Vol. 222. — Is. 4. — Pp. 179–194. DOI: 10.1243/14750902JEME118.
19. *Bahadori A.* Thermal insulation handbook for the oil, gas and petrochemical industries: Monograph / A. Bahadori. — Amsterdam: Elsevier, 2014. — 394 p. DOI: 10.1016/B978-0-12-800010-6.00004-6.
20. *Мьо Ч. Т.* Анализ способов повышения эффективности вспомогательных котельных установок нефтеналивных судов: дис. ... канд. техн. наук; специальность: 05.08.05 «Судовые энергетические установки и их элементы» / Ч. Т. Мьо. — СПб.: СПбГМТУ, 2015. — 158 с.
21. *Пьяе П. А.* Разработка типоразмерного ряда двухступенчатых паровых котлов / П. А. Пьяе, Г. А. Архипов, А. Г. Даниловский // Сборник материалов пятой Всероссийской межотраслевой научно-технической конференции. — СПб.: Изд-во СПбГМТУ, 2016. — С. 221–224.
22. *Пьяе П. А.* Создание ряда двухступенчатых утилизационных котлов для морских судов / П. А. Пьяе // Сборник материалов VII межвузовской научно-практической конференции аспирантов, студентов и курсантов. — СПб.: Изд-во ГУМРФ им. адм. С. О. Макарова, 2016. — С. 180–183.
23. *Даниловский А. Г.* Анализ методов повышения эффективности судовой вспомогательной котельной установки/ А. Г. Даниловский, А. А. Иванченко, Чжо ТуМью // Журнал университета водных коммуникаций. — 2012. — № 3. — С. 87–94.
24. *Yordanov V.* Prospects of application of two-stage exhaust gas boiler in dual pressure ship's auxiliary steam generation system / V. Yordanov, A. G. Danilovsky, P. A. Pyae//Collection of the works of thirteen international conference on marine science and technologies «Black Sea 2016». — Bulgaria: BSHC, 2016.— Pp. 215–220.

25. Архипов Г. А. Повышение тепловой экономичности судовой вспомогательной котельной установки / Г. А. Архипов, А. Г. Даниловский, П. А. Пьяе // Сборник научных трудов профессорско-преподавательского состава Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — СПб.: Изд-во ГУМРФ им. адм. С. О. Макарова, 2016. — С. 21–30.

26. Пьяе П. А. Структура модели проектирования двухступенчатого утилизационного котла / П. А. Пьяе, А. Г. Даниловский // Сборник материалов Всероссийского межотраслевого научно-технического форума. — СПб.: Изд-во СПбГМТУ, 2017. — С. 264–268.

27. Пьяе П. А. Методика оптимизации типоразмерного ряда двухступенчатых утилизационных котлов / П. А. Пьяе, А. Г. Даниловский // Сборник материалов Всероссийского межотраслевого научно-технического форума. — СПб.: Изд-во СПбГМТУ, 2017. — С. 260–264.

28. Пьяе П. А. Оптимизация типоразмерного ряда двухступенчатых утилизационных котлов / П. А. Пьяе // Сборник материалов седьмой Всероссийской межотраслевой научно-технической конференции. — СПб.: Изд-во СПбГМТУ, 2018. — С. 335–339.

29. Wärtsilä I-SOx scrubber system. — Finland: Wärtsilä, 2017. — 4 p.

30. Федеральное агентство морского и речного транспорта (Росморречфлот) [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <http://www.morflot.ru/> (дата обращения: 01.05.2018).

31. Луцкевич А. М. СПГ-бункеровщик родом из Петербурга / А. М. Луцкевич, А. Б. Крестьянцев // Портныйос. Портовый сервис. — 2017. — № 1 (25). — С. 74–77.

32. Даниловский А. Г. Типоразмерный ряд двухступенчатых утилизационных котлов / А. Г. Даниловский, И. В. Атанасов, П. П. Аунг // Морские интеллектуальные технологии. — 2017. — Т. 3. — № (37). — С. 54–59.

REFERENCES

1. Freestone, D., K. M. Gjerde, R. Rayfuse, and D. V. Zwaag. “International union for the conservation of Nature.” *The International Journal of Marine and Coastal Law* 23.2 (2008): 359–363. DOI: 10.1163/092735208X295882
2. *Environmental product guide. Environmental technologies*. Vaasa: Wärtsilä, 2017.
3. *Rukovodstvo po sredstvam zashchity okružhayushchei sredy kompanii Wärtsilä*. Vaasa: Wärtsilä, 2012.
4. Demidova, N. P., A. A. Marchenko, and O. A. Onishchenko. “Basic indexes of ship fuel and their basic operating properties.” *Bulletin of Kamchatka state technical university* 32 (2015): 6–11.
5. *Rukovodstvo na izdelie skrubber (gazochistitel)*. Finland: Wärtsilä, 2013.
6. Zhou, J., S. Zhou, and Y. Zhu. “Experiment and prediction studies of marine exhaust gas SO₂ and particle removal based on NaOH solution with a U-type scrubber.” *Industrial and engineering chemistry research* 56.43 (2017): 12376–12384. DOI: 10.1021/acs.iecr.7b02397.
7. *SOx scrubber technology*. Finland: Wärtsilä, 2017.
8. *Methanol as an alternative fuel for vessels. Public final report*. Netherland: Maritime Knowledge Centre, 2017.
9. Li, G. “Dimethyl Ether (DME) - a new alternative fuel for diesel vehicle.” *Advanced materials research journal* 156–157 (2010): 1014–1018. DOI:10.4028/www.scientific.net/AMR.156-157.1014.
10. Malahov, Aleksey, R. Gudilko, A. Palagin, and Igor Maslov. “Efficiency improvement of ships operation by water-fuel emulsion using.” *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies* 3.8(81): 48–53. DOI: 10.15587/1729-4061.2016.72544
11. Shageev, V. F., and E. M. Hairieva. “Use water-fuel emulsion as a method energy-saving and increases of ecological safety of the power factories.” *Nauchnye problemy transporta Sibiri i Dal'nego Vostoka* 1 (2011): 174–176.
12. Kuimov, D. N., M. S. Minkin, and A. D. Lukyanov. “Low-sulfur fuel and oil production.” *The collection of the papers of material science forum* 870 (2016): 671–676. DOI:10.4028/www.scientific.net/MSF.870.671.
13. Eelco, D. B., and H. Maarten. *Scrubber – An economic and ecological assessment*. Accessment. Delft: NABU, 2015.
14. *LPG for marine engines. The marine alternative fuel*. France: WLPGA, 2017.
15. *Guide to LPG Use in waterborne vessels*. France: WLPGA, 2017.
16. Sveinbjorn, K. A. *Feasibility Study on Propane and Butane as Marine Fuel. Master thesis*. Sweden: Chalmers University of Technology, 2011.
17. Christen, C., and D. Brand. “IMO TIER 3: Gas and dual fuel engines as a clean and efficient solution (CIMAC 2013).” *Dvigatellestroenie* 4 (2013): 42–56.

18. Han, S., J. Y. Lee, Y. I. Park, and J. Che. "Structural risk analysis of an NO96 membrane-type liquefied natural gas carrier in Baltic ice operation." *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part M: Journal of Engineering for the Maritime Environment* 222.4 (2008): 179–194. DOI: 10.1243/14750902JEME118.
19. Bahadori, A. *Thermal insulation handbook for the oil, gas and petrochemical industries. Monograph.* Amsterdam: Elsevier, 2014.
20. Myo, K. T. *Analiz sposobov povysheniya effektivnosti vspomogatel'nykh kotel'nykh ustanovok neftenalivnykh sudov.* PhD diss. SPb.: SPbGMTU, 2015.
21. Pyae, P. A., G. A. Arkhipov, and A. G. Danilovsky. "Razrabotka tiporazmernogo ryada dvukhstupenchatykh parovykh kotlov." *Sbornik materialov pyatoi Vserossiiskoi mezhotraslevoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii.* SPb.: Izd-vo SPbGMTU, 2016. 221–224.
22. Pyae, P. A. "Sozdanie ryada dvukhstupenchatykh utilizatsionnykh kotlov dlya morskikh sudov." *Sbornik materialov VII mezvuzoskoi nauchno-prakticheskoi konferentsii aspirantov, studentov i kursantov.* SPb.: Izd-vo GUMRF im. adm. S. O. Makarova, 2016. 180–183.
23. Danilovsky, A. G., A. A. Ivanchenko, and K. T. Myo. "Analysis of the methods of increasing the efficiency of the ship auxiliary boiler installation." *Zhurnal universiteta vodnykh kommunikatsii* 3 (2012): 87–94.
24. Yordanov, V., A. G. Danilovsky, and P. A. Pyae. "Prospects of application of two-stage exhaust gas boiler in dual pressure ship's auxiliary steam generation system." *Collection of the works of thirteen international conference on marine science and technologies «Black Sea 2016».* Bulgaria: BSHC, 2016: 215–220.
25. Arkhipov, G. A., A. G. Danilovsky, and P. A. Pyae. "Improving heat economy ship auxiliary boiler plant." *Sbornik nauchnykh trudov professorsko-prepodavatel'skogo sostava gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova.* SPb.: Izd-vo GUMRF im. adm. S.O. Makarova, 2016. 21–30.
26. Pyae, P. A., and A. G. Danilovsky. "Struktura modeli proektirovaniya dvukhstupenchatogo utilizatsionnogo kotla." *Sbornik materialov Vserossiiskogo mezhotraslevoi nauchno-tekhnicheskogo foruma.* SPb.: Izd-vo SPbGMTU, 2017. 264–268.
27. Pyae, P. A., and A. G. Danilovsky. "Metodika optimizatsii tiporazmernogo ryada dvukhstupenchatykh utilizatsionnykh kotlov." *Sbornik materialov Vserossiiskogo mezhotraslevoi nauchno-tekhnicheskogo foruma.* SPb.: Izd-vo SPbGMTU, 2017. 260–264.
28. Pyae, P. A. "Optimizatsiya tiporazmernogo ryada dvukhstupenchatykh utilizatsionnykh kotlov." *Sbornik materialov sed'moi Vserossiiskoi mezhotraslevoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii.* SPb.: Izd-vo SPbGMTU, 2018. 335–339.
29. *Wärtsilä I-SOx scrubber system.* Finland: Wärtsilä, 2017.
30. Federal'noe agentstvo morskogo i rechnogo transporta (Rosmorrechflot). Web. 1 May 2018 <<http://www.morflot.ru/>>.
31. Lutskevich, A. M., and A. B. Krest'yantsev. "SPG – bunkerovshchik rodom iz Peterburga." *Portn'yus. Portovyi servis* 1(25) (2017): 74–77.
32. Danilovsky, A., I. Atanasov, and P. Aung. "Size-range of two-step recycling boilers." *Marineintellectualtechnologies* 3.3(37)(2017): 54–59.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Пьяе Пхио Аунг — аспирант
Научный руководитель:
 Даниловский Алексей Глебович —
 доктор технических наук, доцент
 Санкт-Петербургский государственный морской
 технический университет
 190008, Российская Федерация, Санкт-Петербург,
 ул. Лоцманская, 3
 e-mail: 023.pyaephyo@gmail.com

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Pyae, Phyo Aung — Postgraduate
Supervisor:
 Danilovsky, Alexey G. —
 Dr. of Technical Sciences, associate professor
 Saint-Petersburg State Marine Technical
 University
 3 Lotsmanskaja Str., St. Petersburg, 190008,
 Russian Federation
 e-mail: 023.pyaephyo@gmail.com

Статья поступила в редакцию 20 июня 2018 г.
 Received: June 20, 2018.

DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-4-804-817

ANALYSIS CORRECTITUDE SIMULATORS PROGRAMS OF DIESELSIM DPS 100-GFCA, DPS 100 L-MC AND CALCULATING HEAT LOAD LIMIT CHARACTERISTIC FOR THIS ENGINES

V. N. Kucherov

G.I. Nevelskoy Maritime State University, Vladivostok, Russian Federation

This study work has been done on simulators of DPS 100-GFCA, DPS 100 L-MC type, Kongsberg Maritime (Norway). They simulate the working process of modern long-stroke diesel engines 6L 90GFCA and 5L90MC, B&W and MAN B&W as a part of supertanker propulsion plant, including all elements and systems of propulsion plant at vary operating conditions.. The programs show the complex interaction of factors and characteristics when solving complex tasks, defining co-operation of diesel engine and propulsion system's elements. This investigation is necessary for analyses the efficiency, completeness and adequacy of solving problems that are reproduced by simulators in comparison with real processes in propulsion plant. The study purpose was the checking of programs correctness. The solving of such problems can be attributed to the category of scientific research. The practical significance of the study work consists of correcting of obtained by simulators data and to define some data of individual tasks, especially in the case of limit characteristics of the heat load. Marked mistakes in the working process simulation can be useful for the designers of the new generation simulators. This information contains analysis of the correctness of computer programs, calculating working process changing in simulated diesel engines under different service conditions. In the course of study work the comparative analysis of simulators data of work process was made under normal and malfunction conditions of simulated elements. The number of mistakes devoted to the problem of heavy screw characteristics in ice conditions was also represented in the study work.

There are many mistakes and simplifications in some parameters behavior in case of malfunction at some elements of the engine. In programs the influence of back pressure after gas turbine, as a major factor, and air resistance of cylinder at air supply of the engine are omitted. There are a lot of mistakes in analyzing fuel oil injection parts malfunction. For exemplify, the leakage from wore plunger and barrel of fuel injection pump and injector simulator reproduce as simple lost of fuel dosage with decreasing exhaust gas and cylinder wall temperature. Really this faults lead to defective fuel atomizing and influence combustion and working process. As a result will be dropping time injection open, time begin ignition and combustion process degradation with increasing exhaust gas and cylinder wall temperature. This malfunction and especially leaking injector needle are the most often at operating condition and always lead to increasing exhaust gas temperature and heat load of this cylinder. Existing programs has no characteristics to limit heat load. They are calculated by using data from 6S50MC, UECL, UECLS2 diesels as mathematical model for each simulated engine. Then they are added for use. When the audience of different level competence works on simulators, its work should provide competent and comprehensive understanding of complex processes of ship's machinery.

Many errors and simplifications in behaviour some parameters in case of malfunction at some elements of engine are eventual and not negative only. As known, the most effective form of teaching is interactive mode. It is recommended for instructor to analyze and discuss simulators data to consider the questions in all its aspects with cadets and engineers after making every task.

Keywords: Simulator, simulators program, training learning, simulated processes, mistakes, discorrections, pitch characteristics, heat stresses, mechanical stresses, thermal load limit characteristics.

For citation:

Kucherov, Vladimir N. "Analysis correctitude simulators programs of DIESELSIM DPS 100-GFCA, DPS 100 L-MC and calculating heat load limit characteristic for this engines." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 10.4 (2018): 804–817. DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-4-804-817.

УДК 004: 621.43: 629.5

АНАЛИЗ КОРРЕКТНОСТИ ПРОГРАММ ТРЕНАЖЁРОВ DIESELSIM DPS 100-GFCA, DPS 100 L-MC И ПОСТРОЕНИЕ ОГРАНИЧИТЕЛЬНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ПО ТЕПЛОВОЙ НАПРЯЖЁННОСТИ ДИЗЕЛЕЙ

В. Н. Кучеров

ФГБОУ ВО «Морской государственный университет имени адмирала Г. И. Невельского»,
Владивосток, Российская Федерация

Работа выполнена на тренажерах типа DPS 100-GFCA и DPS 100L-MC фирмы Kongsberg Maritime (Норвегия), которые имитируют работу современных длинноходных дизелей 6L90GFCA и 5L90MC фирмы V&W и MAN B&W в составе пропульсивного комплекса крупнотоннажных танкеров, включая все элементы и системы силовой установки при различных условиях эксплуатации. Целью исследований являлась проверка корректности программ, отображающих сложное взаимодействие факторов и параметров при решении комплексных задач, определяющих работу главного двигателя в составе пропульсивного комплекса судна при нарушениях в функционировании основных элементов главного двигателя, а также при работе по «тяжелым» винтовым характеристикам. Подобные задачи относятся к разряду научных исследований. Практическая значимость исследования состоит в корректировке полученных данных, уточнении отдельных задач и особенно в вопросах разработки ограничительных характеристик по тепловой напряженности двигателя. Отмеченные ошибки в моделировании рабочих процессов могут быть полезны для разработчиков тренажеров нового поколения. В ходе исследования и сравнительного анализа, полученных на тренажёре данных, выявлены неточности, недоработки и ошибки в моделировании многих параметров рабочего процесса, а также в особенностях работы двигателя на утяжеленных винтовых характеристиках в ледовых условиях. Показаны рабочие режимы на ограничительных характеристиках по тепловой напряженности дизелей S50MC, UECL, UECLS2, которые приняты за математическую модель для имитируемых двигателей. Разработанные характеристики показаны в линейных и логарифмических координатах. Отмеченные упрощения и даже ошибки в моделировании сложных процессов нельзя считать только негативными. После выполненных слушателями исследований на тренажёрах преподаватель может в интерактивной форме дискуссии или круглого стола провести развернутый анализ корректности полученных результатов в широком аспекте сопутствующих факторов влияния.

Ключевые слова: тренажёр, компьютерная программа, моделируемые процессы, неточности, упрощения, винтовые характеристики, тепловая и механическая напряженность, ограничительные характеристики.

Для цитирования:

Кучеров В. Н. Анализ корректности программ тренажёров DIESELSIM DPS 100-GFCA, DPS 100 L-MC и построение ограничительных характеристик по тепловой напряжённости дизелей / В. Н. Кучеров // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2018. — Т. 10. — № 4. — С. 804–817. DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-4-804-817.

Введение (Introduction)

Технический прогресс и совершенствование силовых установок современных судов неразрывно связаны с появлением и развитием микропроцессорных систем управления и контроля параметров в системах и элементах силовых установок. Дальнейшее совершенствование и расширение сфер, направлений и объема внедрения микропроцессорных систем привели к созданию электронно-управляемых механизмов. По сложности и ответственности к ним, в первую очередь, относятся главные и вспомогательные двигатели внутреннего сгорания, надежность которых определяет безопасность мореплавания.

Для изучения новой техники и овладения навыками управления и эксплуатации современных главных (ГД) и вспомогательных двигателей в составе судовой энергетической установки требуются максимально реалистичные тренажеры машинных отделений (ТМО). Для идентификации явлений, обобщения и умения применять теоретические знания в анализе комплекса параметров, в частности, на главных и вспомогательных двигателях, тренажёр позволяет курсантам приобретать навыки механика-эксплуатационника.

Для совершенствования подготовки специалистов и глубокого понимания взаимосвязей между параметрами рабочего процесса двигателей и пропульсивного комплекса в целом очень большое значение имеет корректность программ и полнота информации, которую отображает тренажёр. Наиболее важны адекватность данных, полученных на тренажере, в сравнении с реальным двигателем и его убедительная реалистичность при работе со слушателями курсов повышения квалификации — как с младшими механиками (уровень эксплуатации), так и со вторыми и старшими механиками (уровень управления) в соответствии с классификацией Международной конвенции ПДМНВ-78/95. Данная подготовка особенно важна с механиками, которые не работали на современных судах. В работе [1] рассмотрены показатели эффективности ТМО фирм

KongsbergMaritime (Норвегия), *Transas* (Россия) и *Unitest Marine* (Польша), которые используются в морских учебных заведениях морского и рыбопромыслового флота России. В качестве показателей эффективности выбраны реалистичность, функциональность, надежность и качество обучения. Указанные показатели тренажёра должны отвечать требованиям Международной конвенции о подготовке, дипломировании и несении вахты моряков ПДМНВ-78/95 [2] и Международного кодекса по управлению безопасностью эксплуатации судов [3].

Этим же вопросам посвящена статья [4], в которой приведен полный перечень минимального стандарта компетенций по международной конвенции ПДМНВ-78/95 для подготовки механиков на уровне «эксплуатации» и «управления». Далее показано, какие позиции конвенционных требований выполняются, а какие нет (вплоть до ведения технической документации и др.). Предлагается разработать программы для работы по всем позициям функций, включая работу с документацией. В работе [5] излагается опыт тренажёрной подготовки судомехаников для повышения их теоретических знаний и профессиональной подготовки в целом. Работа [6] также посвящена вопросам повышения эффективности и безаварийности работы судовой энергетической установки (СЭУ) посредством тренажёрной подготовки ее операторов. В статье [7] рассматривается программа и этапы комплексной предрейсовой подготовки инженерно-технического состава судна с использованием тренажера ERS 5000 FULL MISSION компании *Transas* с оценкой уровня тренажёрной подготовки по методике конвенции ПДНВ-95. В статье [8] приводится список средств поэтапной подготовки специалистов с использованием трехуровневой системы управления судовыми электроэнергетическими установками с дизель-генераторными агрегатами. В работе [9] рассматривается надежность эргатических составляющих морских тренажёрно-обучающих систем. Все эти работы касаются методики обучения, рациональных приемов работы со слушателями, психологического, человеческого и других факторов, влияющих на эффективность тренажёрной подготовки, но не рассматривают вопросы технической корректности информации, которая выдается тренажером.

Целью выполненного исследования является сравнительный анализ корректности программ и, соответственно, полученных на тренажере данных о параметрах рабочего процесса и характере их протекания при нормальном и измененном состоянии элементов дизеля в составе пропульсивной установки судна в различных условиях эксплуатации, а также разработка ограничительных характеристик по тепловой напряженности моделируемых двигателей, которые отсутствуют в программах. Разработка этих вопросов имеет аналитический исследовательский характер. К числу решаемых задач, имеющих практическую значимость, следует отнести выявление упрощений, явных недоработок и ошибок в программах тренажеров, которые могут оказать отрицательное влияние на теоретический и практический уровень профессиональной подготовки слушателей. Выявленные недоработки могут быть использованы для совершенствования программ при создании новых модификаций тренажеров.

Методы и материалы (Methods and Materials)

Для проведения исследований использовались тренажёры лабораторной базы Морского государственного университета им. адм. Г. И. Невельского, г. Владивосток. Тренажёры типа DPS 100-GFCA и DPS 100L-MS фирмы *Kongsberg Maritime* [10] имитируют рабочий процесс ГД в различных условиях плавания судна, в том числе при изменении или нарушении нормального функционирования основных элементов ГД, таких как турбокомпрессор и система воздухообеспечения с ее приборами и устройствами, топливная аппаратура высокого давления и фазы топливоподачи, состояние поршневых колец, гидродинамические параметры гребного винта в составе пропульсивного комплекса судна. Отрабатываются и более простые задачи, связанные с эксплуатацией ГД (например влияние внешних условий на рабочий процесс двигателя и тепловое состояние деталей цилиндропоршневой группы (ЦПГ), выполнение стендовых и ходовых испытаний ГД при его работе на винт фиксированного и регулируемого шага с индентификацией и осциллографированием параметров индикаторного процесса и топливоподачи, нарушения в работе масляных и охлаждающих насосов).

В тренажёре DPS 100-GFCA моделируется силовая установка танкера дедвейтом 180000 т с достаточно современным длинноходным дизелем 6L90GFCA. Помимо ГД имитируется работа дизель-генераторов, паровых котлов, механизмов утилизации теплоты и других основных элементов, включая работу всех систем, обслуживающих СЭУ с их автоматикой, системами контроля, характерными нарушениями в работе и т. д.

Тренажёр DPS 100L-МС моделирует силовую установку танкера дедвейтом 184000 т с двигателем 5L90МС. Тренажёр типа DPS 100-GFCA является реальным полномасштабным прототипом центрального поста управления (ЦПУ) силовой установкой крупнотоннажного судна. Он имеет исчерпывающую по функциональности панель мнемосхем с кнопками открытия-закрытия клапанов, запуска и остановки механизмов всех систем и элементов СЭУ (рис. 1).

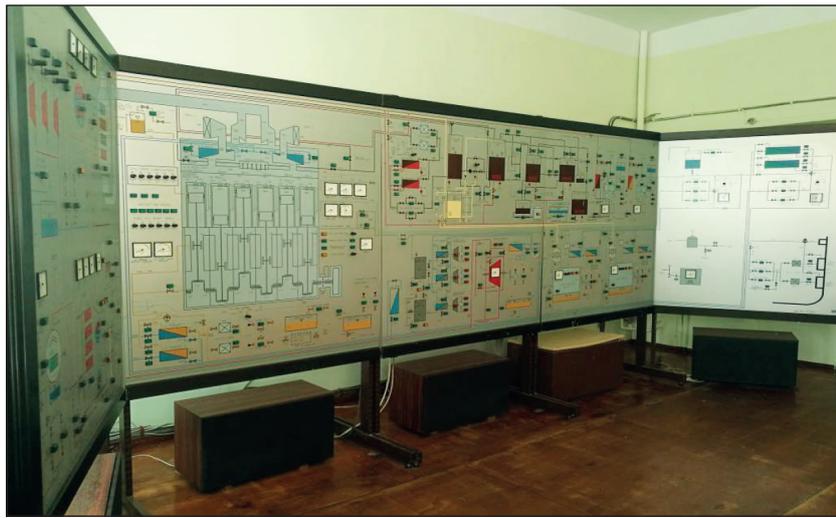


Рис. 1. Мнемосхемы тренажёра типа DPS 100-GFCA

Имеется местный пост управления главным двигателем с медленным проворачиванием ГД при пробных пусках. Запуск в работу каждого механизма сопровождается звуком с характерным для него уровнем и тональностью, создавая реальный эффект присутствия в машинно-котельном отделении. Центральный пост управления с буквенно-цифровым отображением информации на экране монитора имеет панель, где дополнительно показаны основные параметры силовой установки аналоговыми стрелочными указателями, включая панель с крупными указателями основных параметров пропульсивного комплекса: мощность на валу ГД, частота вращения вала, шаговое отношение гребного винта и скорость судна (рис. 2).



Рис. 2. Пост управления тренажёра типа «DPS 100-GFCA»

Эта информация важна оператору при отработке задач при работе ГД по «тяжелым» винтовым характеристикам, например в ледовых условиях или на режимах маневрирования. Тренажёр имеет реальную систему контроля параметров всех систем и уровней рабочих жидкостей, включая шламовые цистерны с аварийно-предупредительной сигнализацией и указанием диапазона рабочих значений, а также системами блокировок. В левой части поста управления имеется панель информации о числе и типе работающих дизель-генераторов, валогенератора или утилизационного турбогенератора с их приоритетами автоматического включения.

На горизонтальной части панели показаны режимы работы основных механизмов систем и устройств (№ 1 или 2, «авто»). Имеется главный распределительный щит для ручного включения генераторов, управления параметрами и контроля нагрузок. Для индицирования и диагностирования рабочего процесса, технического состояния элементов цилиндропоршневой группы и топливной аппаратуры имеется все четыре блока фирмы *Autronika*: индицирование параметров рабочего процесса ГД, осциллографирование процессов топливоподачи, термоанализатор контроля теплового состояния деталей ЦПГ (цилиндровая втулка в поясе первого поршневого кольца в верхней мертвой точке, цилиндрическая крышка, седло выпускного клапана) и датчики технического состояния поршневых колец с распечаткой полученных данных на принтере (см. рис. 2). Котельная и утилизационная установки имеют свой пост управления.

Благодаря высокой информативности, реалистичности процессов и объема получаемой информации оператор или судовой механик может видеть в целом состояние всей силовой установки и пропульсивного комплекса судна на любых режимах работы, не обращаясь к страницам на мониторе, где отображаются все параметры силовой установки с допускаемыми отклонениями. Данные тренажёры используются также в высших учебных заведениях Федерального агентства по рыболовству, Новороссийском государственном университете им. адм. Ф. Ф. Ушакова и др.

Тренажёр DPS 100L-МС выполнен на основе компьютерной сети, где инструктор вводит задачу на несколько мониторов. По информативности и объёму исследуемых процессов и тематике решаемых задач он во многом сопоставим с рассмотренным ранее тренажёром. Он проще и дешевле в исполнении, но имеет в данном варианте только шесть рабочих мест, поскольку каждый курсант работает на своем мониторе, последовательно вызывая на экран, например, каждую систему для подготовки ее к работе. Основным недостатком тренажёров данного типа является их низкая реалистичность и отсутствие информации о состоянии силовой установки в целом в период решения задач, связанных, в первую очередь, с изменением режимов работы пропульсивного комплекса судна. На аналогичной основе группового обучения в компьютерной сети разработаны тренажёры типа ERS 4000 фирмы *Transas*, где инструктор управляет классом до 12 рабочих мест обучаемых.

Результаты (Results)

Тренажёры позволяют выполнять большое количество лабораторных работ, в основном на уровне подготовки вахтенных механиков по программе вуза. При постановке более сложных задач на тренажере DPS-100-GFCA, которые заложены в типовой перечень (таких как анализ условий работы системы воздухообеспечения дизеля, топливоподающих элементов с их неисправностями и нарушениями), в работе имеются явные упущения, упрощения и неверные данные для анализа по алгоритму контрольных показаний параметров при наличии различных неисправностей. Так, нарушения с протечками топлива при впрыскивании с увеличенными зазорами в прецизионных парах «игла – корпус распылителя» и в плунжерной паре топливного насоса высокого давления входят в разные задачи, хотя это единая система высокого давления при впрыске топлива. В данных индицирования дизеля при номинальной мощности показано максимальное давление впрыска топлива 482 бар (48,2 МПа), а это явная ошибка, которая будет создавать у слушателей неверное представление о параметрах впрыскивания топлива. Даже у дизеля первой степени наддува VTBF это значение составляет 60,0 – 70,0 МПа, а в дизелях LMC — 90,0 МПа и более, в аккумуляторных системах впрыска — 90,0 МПа.

В задаче о влиянии изнашивания в прецизионных элементах плунжерной пары и распылителя изменение энергетических и теплотехнических параметров отражено правильно, кроме показателей и критериев тепловой напряженности: температур цилиндрической втулки, крышки и седла выпускного клапана. Указанные протечки даже при самом малом «объеме задания» примитивно отображают ее как потерю цикловой подачи топлива и, как следствие, понижение тепловой напряженности и уменьшение температуры отработавших газов. Однако в эксплуатации это наиболее частое нарушение, наряду с подтекающей иглой форсунки, которое однозначно приводит к ухудшению качества распыливания, уменьшению действительного угла опережения подачи топлива, увеличению фазы догорания топлива на линии расширения, повышению тепловой напряженности деталей цилиндропоршневой группы и росту температуры отработавших газов. Указанные в задаче изменения параметров не могут наблюдаться на работающем дизеле, поскольку при значительных протечках топлива невозможен даже запуск дизеля.

В задаче «утечка топлива через форсунку (износ направляющей иглы форсунки)» энергетические параметры двигателя уменьшаются исключительно как простая потеря топлива без связи ее с качеством распыливания и сгорания. На осциллограмме процесса топливоподачи правильно отражается падение давления впрыскивания и продолжительности подачи топлива, но при этом не изменяется R_p (скорость нарастания давления до открытия иглы форсунки) и действительный угол опережения подачи. Как и в предыдущей задаче, неверно отображается падение температуры отработавших газов на цилиндре *до* и *после* турбины и уменьшение температуры на цилиндрической втулке, крышке и седле выпускного клапана. Как известно, частые случаи повышения температуры газов на одном из цилиндров с уменьшением $P_{\max}(P_2)$, в первую очередь, взаимосвязаны с ухудшением технического состояния форсунки по указанным ранее причинам. Если замена форсунки не изменяет положение, причину ищут в техническом состоянии топливного насоса высокого давления, его клапанов и плунжерной пары. Плохая работа топливной аппаратуры всегда повышает тепловую напряженность цилиндропоршневой группы (ЦПГ) и способствует выгоранию на выпускных клапанах и седлах (естественно, при возросшей температуре).

В задаче «неисправности турбокомпрессора» при анализе системы газотурбинного наддува отсутствуют такие важные составляющие потерь напора, как сопротивление газотока между продувочным ресивером и на входе в турбину (сопротивление при продувке), а также противодействие за турбиной и его существенное влияние на параметры наддува и тепловую напряженность. Чрезмерно завышено влияние сопротивления на всасывающем фильтре компрессора на параметры рабочего процесса. Так, ввод этой неисправности даже в объеме 10 % уже приводит к предельным значениям температуры продувочного воздуха и срабатыванию сигнализации по данному параметру. Позитивно, что во всех этих заданиях ухудшение воздухообеспечения дизеля взаимосвязано с повышением температуры деталей ЦПГ и температуры отходящих газов на цилиндре и газовой турбине.

Особое значение в практической деятельности судового механика имеет выбор ограничительных характеристик по механической и тепловой напряженности дизеля при работе на различных режимах по внешней и винтовой характеристике. Как известно, винтовая характеристика, определяющая зависимость параметров двигателя от частоты вращения вала, работающего на гребной винт, не является собственной характеристикой двигателя, поскольку энергетические и другие его параметры изменяются по закону потребления мощности винтом. В этой сложной системе выделяют гидромеханический комплекс, а именно: валы, гребные винты, корпус судна с рулевым устройством. Гидромеханический комплекс совместно с главным двигателем образуют пропульсивный, или движительный комплекс. Задающим элементом в этой системе является судно, а точнее, зависимость полного сопротивления движению его корпуса в воде от скорости судна. Крутящий момент и мощность, потребляемая винтом, зависят от гидродинамических параметров винта, которые связаны с изменением сопротивления движению судна.

Таким образом, каждому отдельному условию плавания со своим сопротивлением движению корпусу судна соответствует своя характеристика винта, а, следовательно, и двигателя. В основу сравнения винтовых характеристик положена теоретическая или номинальная винтовая

характеристика, которая снимается на стенде, где двигатель нагружается гидротормозом по характерному для винта закону потребления мощности от оборотов, и номинальная (100 %) мощность достигается при номинальной частоте вращения вала. Из сопоставления с теоретической винтовой характеристикой устанавливается понятие гидродинамически «тяжелого» и «легкого» винта и, соответственно, его характеристики [11]. В этом состоит актуальность разработки ограничительных характеристик по тепловой напряженности ГД и умения применять их в различных условиях плавания. В первую очередь, это относится к условиям работы двигателя с возросшим сопротивлением движению судна, т. е. по «тяжелым» винтовым характеристикам с винтом фиксированного шага. К ним относятся условия плавания в шуге, битом льду, преодоление ледовых перемычек в шторм, при обрастании корпуса и гребного винта, наличии бухтин, вмятин, отслоении краски на корпусе судна, при буксировках, плавании на мелководье с глубиной менее 10 – 15 осадок судна и т. д.

Основными показателями механической напряженности в практике эксплуатации являются максимальное давление цикла P_{\max} , частота вращения вала n и крутящий момент $M_{\text{кр}}$ на коленчатом валу дизеля, а также динамическая составляющая — средняя скорость нарастания давления при сгорании топлива и разность давлений P_{\max} и P_{com} (давление в конце процесса сжатия). При работе двигателя с газотурбинным наддувом по «тяжелой» характеристике частота вращения, ограниченная упором топливной рейки на номинальном указателе нагрузки, будет уменьшаться. С уменьшением n падает расход газа на турбину и, как следствие, снижается мощность турбины с уменьшением давления наддува. Далее пропорционально снизится давление конца сжатия P_{com} и P_{\max} , если отсутствует система VIT (Variable Injection Timing), которая изменением угла опережения подачи топлива поддерживает постоянным и номинальным P_{\max} в диапазоне нагрузок по мощности от 110 % до режимов около 78 %. В любом случае условие не превышения максимального давления будет соблюдено. По винтовой характеристике крутящий момент $M_{\text{кр}}$ изменяется по квадратичной параболе по одному закону со средним эффективным давлением P_{me} . Постоянство этих параметров на уровне номинальных значений графически выражается прямой линией из начала координат в точку номинального значения эффективной мощности и частоты вращения в поле винтовых характеристики и легко определяется при индентировании двигателя. Однако работа дизеля по условию постоянства крутящего момента на уровне номинального значения $M_{\text{кр,ном}}$ допускается только на ограниченном начальном участке прямой. Далее вступает в силу ограничения по тепловой напряженности. На начальном участке ограничительной характеристики по тепловой напряженности параметром ограничения может быть коэффициент избытка воздуха для сгорания в любом режиме α_x при условии $\alpha_x \geq \alpha_{\text{ном}}$ ($\alpha_{\text{ном}}$ — коэффициент избытка воздуха на номинальной мощности). Эта кривая располагается и протекает по прямой постоянства крутящего момента $M_{\text{кр,ном}}$ и далее переходит в более крутую характеристику не превышения плотности теплового потока на текущем режиме $q_x \leq q_{\text{ном}}$ ($q_{\text{ном}}$ — тепловой поток на номинальном режиме). Для конкретного дизеля с его системами охлаждения это условие подчиняется закону не превышения температур деталей ЦПГ (температуры цилиндрической втулки, крышки и седла выпускного клапана).

На тренажерах ограничительные характеристики по тепловой напряженности отсутствуют вообще. В работе [12] автором показаны основные упущения в корректности программ тренажеров и построены упрощенные ограничительные характеристики по тепловой напряженности имитируемых двигателей в объеме методического пособия для выполнения курсантами лабораторных работ. В предлагаемой работе представлены уточненные ограничительные характеристики, которые могут быть использованы другими учебными заведениями, имеющими указанные тренажеры.

На рис. 3 показано поле винтовых характеристик двигателя 6S50MC Mark6 фирмы MAN B&W в логарифмических координатах для построения ограничительных характеристик по тепловой напряженности для имитируемых на тренажерах дизелей LGFCA и LMC. Для сравнительного анализа рассмотрены ограничительные характеристики по тепловой напряженности дизеля UEC-L фирмы Mitsubishi в логарифмических координатах (не показаны на рисунке) с форсировкой рабочего процесса, сопоставимой с двигателем LGFCA.

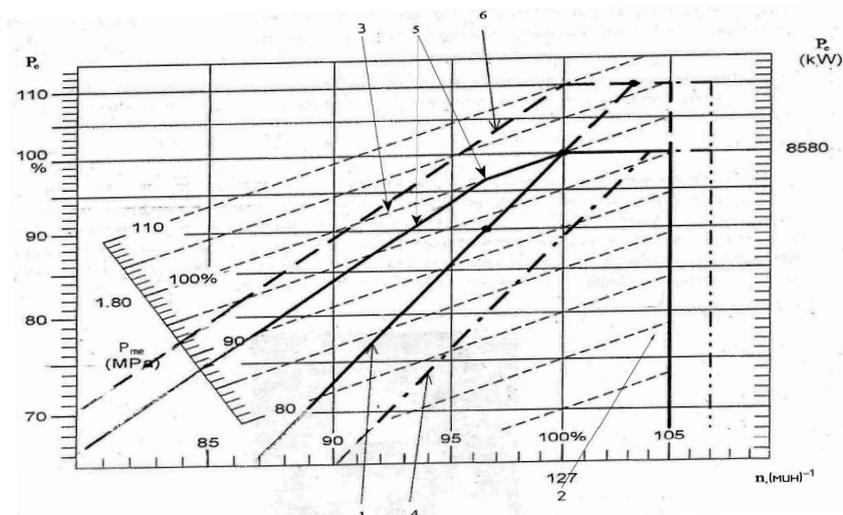


Рис. 3. Ограничительные характеристики по тепловой и механической напряженности в поле винтовых характеристик дизеля 6S50MC Mark 6 в логарифмических координатах:
 1 — номинальная винтовая характеристика двигателя; 2 — режимы перегрузки двигателя;
 3 — ограничительная характеристика по номинальному значению крутящего момента и среднего эффективного давления;
 4 — характеристика рекомендованной гидродинамической «легкости» винта;
 5 — ограничительная характеристика по тепловой напряженности двигателя;
 6 — режимы перегрузок двигателя

На рис. 4 представлены ограничительные характеристики в поле различных нагрузок более форсированного дизеля UEC60LSII фирмы *Mitsubishi*, который сопоставим по параметрам рабочего процесса с двигателями типа SMC и LMC на графике и в тренажёре. Все характеристики указанных двигателей заимствованы из инструкций по их эксплуатации.

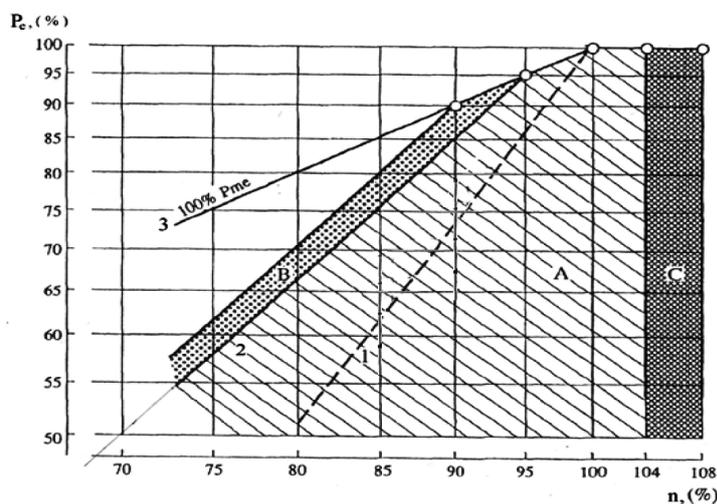


Рис. 4. Винтовые и ограничительные характеристики дизеля UEC60LSII:
 1 — винтовая характеристика номинального режима;
 2 — граница допускаемых режимов по тепловой напряженности;
 3 — ограничительная характеристика по номинальному значению крутящего момента и среднего эффективного давления;
 А — зона допускаемые режимы работы дизеля без ограничений;
 В — зона режимы перегрузки, допускается работа в течение одного часа через 12 ч;
 С — зона режимы перегрузки для ходовых испытаний

Расчеты и анализ протекания ограничительных характеристик по тепловой напряженности дизелей 6S50MC, UECL, UECLS2 показали практически совпадающие между собой в логарифми-

ческих координатах зависимости. При утяжелении винтовой характеристики разрешается работа по ограничительной характеристике $M_{кр.ном}$ только на ее начальном участке до снижения частоты вращения вала на 3,5 – 4,0 %. При дальнейшем утяжелении характеристики рекомендовано уменьшение нагрузки в одинаковой мере на всех указанных дизелях.

На рис. 5 и 6 показано поле винтовых и внешних характеристик двигателя L90GFCA, построенных по данным тренажера для различных условий плавания имитируемого танкера, на котором нанесена ограничительная характеристика по тепловой напряженности, рассчитанная по типовому графику для дизелей S50MC Mark 6 в логарифмических и линейных координатах, в том числе для режимов работы в шуге и мелкобитом льду. Также построены и приведены ограничительные характеристики по тепловой и механической напряженности в поле винтовых характеристик тренажера L90MC в логарифмических и линейных координатах (рис. 5, 7 и 8).

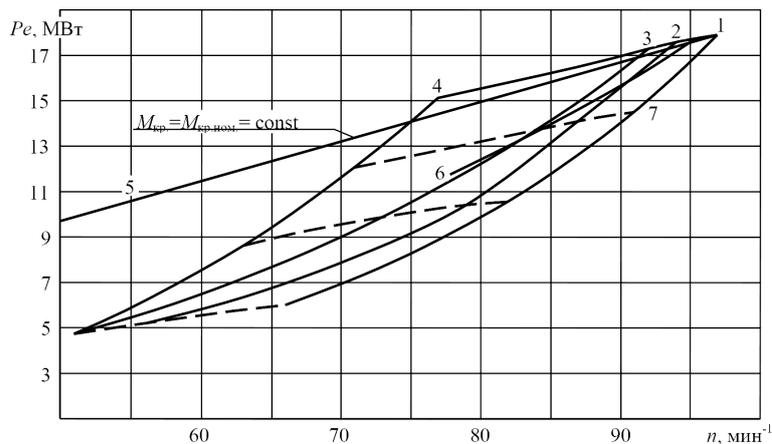


Рис. 5. Ограничительные характеристики двигателя 6L90GFCA в поле винтовых характеристик тренажера DPS100-GFCA в линейных координатах:

- 1 – 4 — внешняя номинальная характеристика;
- 1 – 5 — ограничительная характеристика по номинальному $M_{кр}$ и P_{me} ;
- 1 – 6 — характеристики по тепловой напряженности; 7 — частичная характеристика

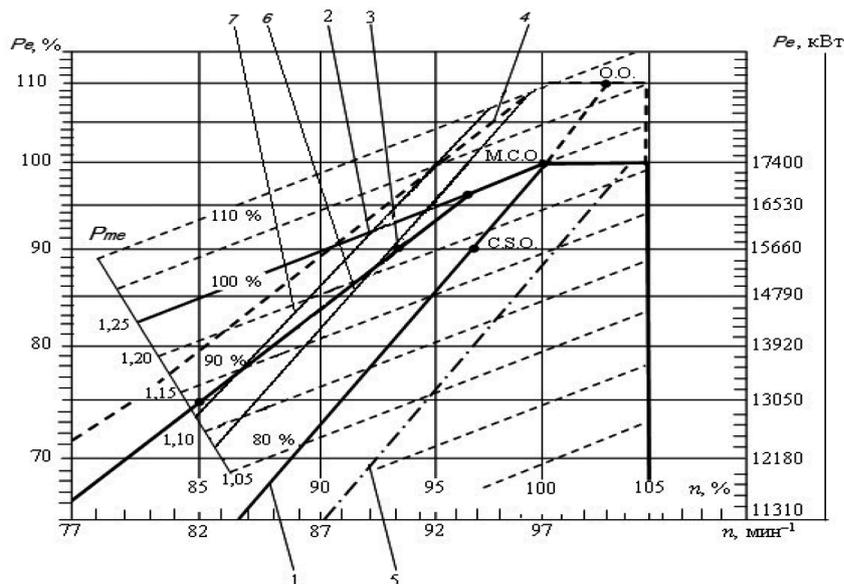


Рис. 6. Ограничительные характеристики дизеля 6L90GFCA в логарифмических координатах:

- 1 — номинальная винтовая характеристика; 2 — ограничительная характеристика по номинальному значению крутящего момента и среднего эффективного давления; 3 — ограничительная характеристика по тепловой напряженности; 4 — винтовая характеристика предельной мощности; 5 — рекомендованная характеристика для выбора степени легкости винта; 6 — ограничительная характеристика при работе в шуге; 7 — ограничительная характеристика при работе в битом льду

При анализе изменения рабочих параметров дизеля по утяжеленным характеристикам (шуга, битый лед, преодоление ледовых перемычек, швартовный режим) закономерно уменьшается частота вращения, секундный расход отработавшего газа и, соответственно, мощность турбины, давление продувочного воздуха и его плотность, а, следовательно, и коэффициент избытка воздуха при положении указателя нагрузки в положении номинального значения. Однако тренажер дает при этом уменьшение температуры отработавших газов в цилиндре, до и после турбины и далее на деталях ЦПГ, включая режим швартовный характеристики.

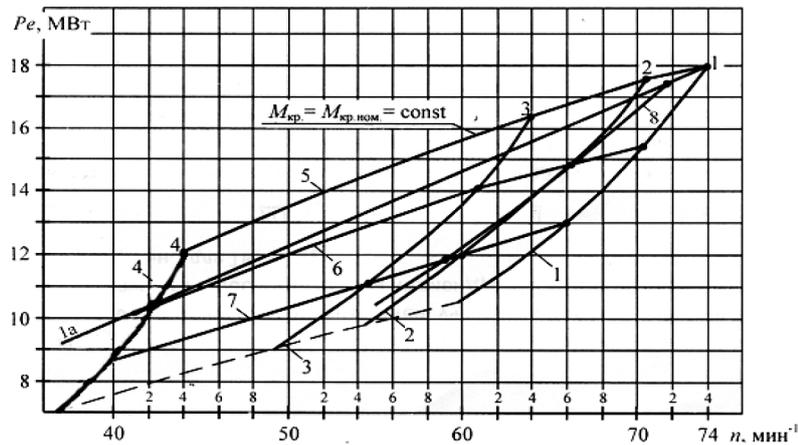


Рис. 7. Ограничительные характеристики двигателя 5L90МС в поле винтовых характеристик тренажера DPS100L-МС в линейных координатах:
 1 — номинальная винтовая характеристика; 2 — винтовая характеристика двигателя при работе в шуге; 3 — винтовая характеристика при работе в битом льду;
 4 — швартовная винтовая характеристика;
 5 — номинальная внешняя характеристика; 6, 7 — частичные характеристики;
 1 – 1а — ограничительные характеристики по номинальному значению $M_{кр}$ и P_{me} ;
 1 – 8 — ограничительные характеристики по тепловой напряженности

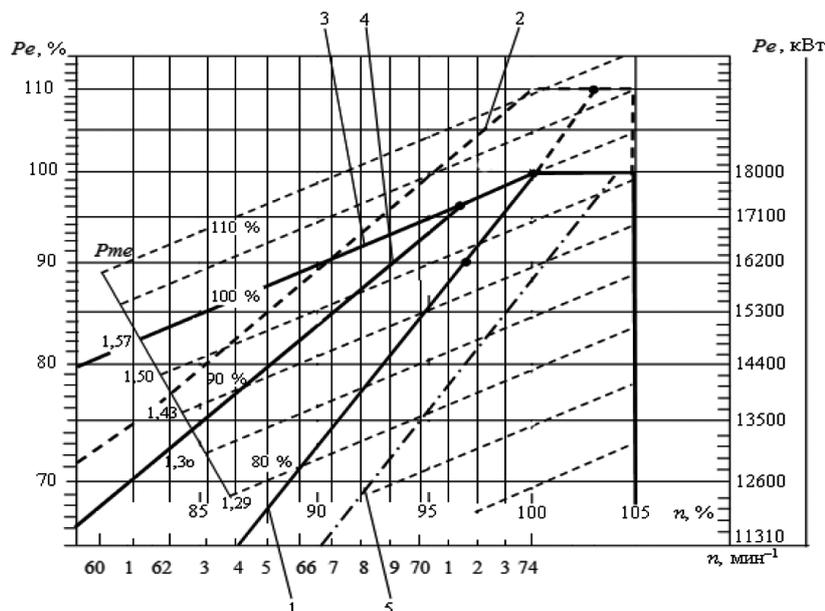


Рис. 8. Винтовые и ограничительные характеристики дизеля 5L90МС в логарифмических координатах:
 1 — номинальная винтовая характеристика; 2 — винтовая характеристика максимальной мощности;
 3 — ограничительная характеристика по номинальному значению $M_{кр}$, P_{me} ;
 4 — ограничительная характеристика по тепловой напряженности;
 5 — рекомендованная характеристика для выбора степени легкости винта

Как известно, температура отработавших газов определяет тепловое состояние рабочего тела вне цилиндра, и при падении секундного расхода газа происходит дополнительное расширение газа в более «свободных» газоходах с уменьшением температуры в значениях, характерных для каждой системы газообмена и наддува. Что касается уменьшения при этом температуры деталей ЦПГ и тепловой напряженности, то это очередная ошибка (см. ограничительные характеристики по тепловой напряженности на рис. 5 и 7). Согласно выполненным автором исследованиям, на дизеле 9RD90 [13] при утяжелении винтовой характеристики в условиях шторма 7 – 8 баллов и волнений 5 – 6 баллов по носу частота вращения при постоянном указателе нагрузки снизилась на $3,2 \text{ мин}^{-1}$, температура $t_{\text{ог}}$ на цилиндре повысилась на 17° , средняя температура цилиндровой крышки — на 20°C . Относительное увеличение перепада температуры по толщине крышки и соответственно плотности теплового потока составило 8 %. Естественно, степень отклонения параметров будет зависеть от параметров пропульсивного комплекса, таких как гидродинамическая «легкость гребного винта», тип системы наддува и газообмена, удельный расход воздуха на двигатель и других параметров, но характер влияния утяжеленной характеристики на тепловую напряженность дизеля не изменится. Что касается швартовного режима, то тренажер «позволяет» снять винтовую характеристику при зафиксированном номинальном указателе нагрузки без повышения тепловой напряженности. Допускаемый режим по механическим нагрузкам можно определить только по $M_{\text{кр.ном}}$ из рис. 5, при котором дизель будет уже значительно перегружен по тепловой напряженности. Ограничительные характеристики по тепловой напряженности на швартовном режиме не попадают в область эксплуатационных режимов на рис. 5 и 7.

Если вводить утяжеление винтовой характеристики при незафиксированной топливной рейке, то в режиме «шуга» регулятор выводит топливную рейку в положение 100 %, мощность возрастает на 7 %, крутящий момент — на 7 % по отношению к номинальным значениям, температуры деталей и отходящих газов возрастают на $5 - 7^\circ \text{C}$; сигнализация о перегрузке по крутящему моменту не срабатывает. В режиме «мелкобитый лед» сигнализация срабатывает, но указатель нагрузки остается в положении 100 %, мощность превышает номинальные значения на 5 %, крутящий момент — на 9 %, температура стенок и газов не изменяется по отношению к менее нагруженному режиму «шуга». И только в швартовном режиме регулятор выводит рейку в положение номинального значения крутящего момента. При этом температура по сравнению с режимом «шуга» понизилась на цилиндровой втулке на 22°C , на цилиндровой крышке — на 23°C , на седле выхлопного клапана — на 33°C , температура отходящих газов на цилиндре понизилась на 38°C и перед турбиной — на 53°C . Так, при испытании двигателя MAN K6Z57/80C по швартовной характеристике в балластном состоянии судна, температура на цилиндровой крышке и цилиндровой втулке достигла номинальных значений при частоте вращения вала $0,72n_{\text{ном}}$ [14].

В силу индивидуальности пропульсивного комплекса каждого судна, степени и особенностей наддува ГД устанавливаются пределы допустимых режимных параметров по швартовной характеристике: $n = (0,5 - 0,6)n_{\text{ном}}$; $P_{\text{me}} = (0,5 - 0,6)P_{\text{me ном}}$; $P_e = (0,25 - 0,3)P_{e \text{ ном}}$ [15].

Обсуждение (Discussion)

В работе рассмотрены основные типы тренажеров машинного отделения, которые используются в высших учебных заведениях морского и рыбопромыслового флота. Описаны их возможности с позиции реалистичности, функциональности и применимости для повышения уровня и качества знаний курсантов и специалистов флота. Данное исследование выполнено на тренажерах типа DPS 100-GFCA и DPS 100L-MC фирмы *Kongsberg Maritime*, которые имитируют работу современных длинноходных дизелей 6L90GFCA и 5L90MC фирмы *B&W* и *MAN B&W* в составе пропульсивного комплекса крупнотоннажных танкеров, включая все элементы и системы силовой установки при различных условиях эксплуатации.

Целью исследований являлась проверка корректности программ, отображающих сложное взаимодействие факторов и параметров при решении комплексных задач, определяющих совмест-

ную работу ГД в составе пропульсивного комплекса судна. Указанные тренажеры действительно обладают большими возможностями для анализа многих эксплуатационных задач, но не все компьютерные программы адекватно отображают характер протекания сложных процессов и параметров, описывающих эти процессы. Основное внимание в статье уделено ошибкам, недоработкам и упрощениям в компьютерных программах по ГД, которые могут оказать отрицательное влияние на уровень знаний и понимание сложных эксплуатационных вопросов. Большинство ошибок наблюдается в моделировании процессов газообмена, наддува и особенно в процессах с нарушениями нормального функционирования топливной аппаратуры с последующим влиянием этих факторов на рабочий процесс и тепловую нагрузку двигателя. Работа двигателя по «тяжелым» винтовым и внешним характеристикам в ледовых условиях не увязана с ростом тепловой напряженности, а ограничительные характеристики по тепловым нагрузкам отсутствуют вообще.

Практическая значимость исследования состоит в корректировке полученных данных, уточнении отдельных задач, особенно в вопросах разработки ограничительных характеристик по тепловой напряженности двигателя. Отмеченные ошибки в моделировании рабочих процессов могут быть полезными для разработчиков тренажеров нового поколения. Выполненные работы [1], [5] – [9] посвящены показателям реалистичности, функциональности тренажеров, эффективности и качества обучения, но совершенно не касаются корректности получаемой на тренажере информации. Автор считает нецелесообразным создание тренажеров по всем позициям Международной конвенции о подготовке, дипломировании и несении вахты моряков (ПДМНВ-78/95), как предлагается в работе [4].

Выводы и предложения (Conclusions and Suggestions)

Показаны основные инженерные задачи по анализу рабочих процессов ГД в эксплуатации. Тренажеры имитируют рабочий процесс ГД в различных условиях плавания судна, в том числе при изменении или нарушении нормального функционирования основных элементов ГД, таких как турбокомпрессор и система воздухообеспечения с ее приборами и устройствами, топливная аппаратура высокого давления и фазы топливоподачи, состояние поршневых колец, гидродинамические параметры гребного винта в составе пропульсивного комплекса судна. Отрабатываются и более простые задачи, связанные с эксплуатацией ГД (например влияние внешних условий на рабочий процесс двигателя и тепловое состояние деталей цилиндропоршневой группы, выполнение стендовых и ходовых испытаний ГД при его работе на винт фиксированного и регулируемого шага с индицированием и осциллографированием параметров индикаторного процесса и топливоподачи, нарушения в работе масляных и охлаждающих насосов и т. д.). Выполнен анализ корректности компьютерных программ, описывающих рабочие процессы, тепловую и механическую напряженность современных дизелей в различных условиях эксплуатации. Выявлены упрощения и неверные представления о взаимосвязях параметров двигателя. Проанализированы ограничительные характеристики по тепловой и механической напряженности современных дизелей S50MC, UECL, UECLS2, показано протекание характеристик в логарифмических координатах для дизелей S50MC и UECLS2. На их основе разработаны и построены указанные характеристики для имитируемых двигателей, которые отсутствовали на тренажерах.

В процессе обучения курсантов и механиков флота на тренажерах следует указывать на отмеченные ошибки, искажающие важнейшие закономерности протекания рабочих процессов в современных дизелях. Работа на тренажерах слушателей разного уровня подготовки должна способствовать совершенствованию грамотного, всестороннего понимания взаимосвязанных процессов в судовой технике. Отмеченные многочисленные упрощения и даже принципиальные ошибки в моделировании сложных процессов в двигателе и пропульсивном комплексе в целом нельзя считать только негативными. После выполнения каждого опыта преподаватель должен поставить перед обучаемыми вопрос: *где и какие диагностические признаки расходятся с алгоритмом выявления неисправностей* и в интерактивной форме дискуссии вместе со слушателями проанализировать полученные результаты.

По мнению автора, оптимальным типом тренажера для обучения курсантов и младших механиков на уровне эксплуатации является тренажер типа DPS 100-GFCA, который является реальным полномасштабным прототипом ЦПУ силовой установкой крупнотоннажного судна. Высокая информативность, реалистичность процессов и полный объем получаемой информации позволяют обучаемому видеть в комплексе состояние всей силовой установки и пропульсивного комплекса судна на любых режимах работы, не обращаясь к страницам на мониторе. Умение видеть и правильно использовать эту информацию является основной задачей механика-эксплуатационника. Для обучения механиков на уровне управления необходимы тренажеры только с высокой корректностью программ, которые позволят специалисту рассмотреть важные вопросы для повышения уровня собственных знаний и квалификации. В данных случаях важна грамотная консультация инструктора, ибо на тренажере с примитивной информацией специалист даже посредством уровня потеряет интерес к работе и обучаться не станет.

Надежная работа современных форсированных двигателей возможна только при грамотной и культурной их эксплуатации. Тренажерная подготовка должна проходить только совместно с лекционными занятиями для повышения теоретической и практической подготовки специалистов, для выработки умения анализировать сложные процессы, протекающие в элементах судовой техники.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Соболенко А. Н.* Обобщение опыта эксплуатации тренажеров машинного отделения морского судна / А. Н. Соболенко, Ю. А. Корнейчук, Д. К. Глазюк // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Морская техника и технология. — 2016. — № 2. — С. 59–69.
2. Международная конвенция о подготовке, дипломировании и несении вахты моряков (ПДМНВ-78/95). — СПб.: Изд-во ЦНИИМФ, 1996. — 552 с.
3. Международный кодекс по управлению безопасностью (МКУБ) и руководства по его выполнению. — СПб.: Изд-во ЦНИИМФ, 2014. — 152 с.
4. *Vagabov I. I.* Diesel Simulator as Unique Means for Bringing of Marine Engineers' Competence in Conformity with the Requirements of the STCW 95 Convention / I. I. Vagabov, A. N. Sobolenko, Y. A. Korneychuk // Proc. of 5th Intern. Conf. on Engine Room Simulators (Singapore, 25-26 June 2001). — Singapore Polytechnic and Maritime Academy, 2001. — Pp. 158–166.
5. *Соболенко А. Н.* Обобщение опыта тренажерной подготовки судомехаников / А. Н. Соболенко // Материалы и доклады Междунар. науч.-технич. конф. «Фундаментальные исследования океанотехники и морской инфраструктуры: Теория. Эксперимент. Практика». — Комсомольск-на-Амуре, 2015. — С. 200–203.
6. *Соболенко А. Н.* Повышение эффективности и безаварийности работы СЭУ посредством тренажерной подготовки её операторов / А. Н. Соболенко, Д. К. Глазюк // Рыбное хозяйство. — 2014. — № 1. — С. 12–14.
7. Kongsberg Maritime [Электронный ресурс]. — Режим доступа: www.km.kongsberg.com/ (дата обращения: 03.04.2018).
8. *Сафин И. В.* Анализ опыта и технологии организации тренажерной подготовки по повышению компетенции инженерно-технического персонала судна на уровне управления в предрейсовый период / И. В. Сафин, К. Л. Обертюр // Судовые энергетические установки. — 2011. — № 28. — С. 92–98.
9. *Дорогань О. И.* Средства поэтапной подготовки специалистов по эксплуатации судового оборудования / О. И. Дорогань, В. М. Рябенский, А. О. Ушкаренко // Науковий вісник Херсонської державної морської академії. — 2014. — № 1. — С. 85–93.
10. *Боран-Кешишьян А. Л.* Надежность эргатических составляющих морских тренажерно-обучающих систем / А. Л. Боран-Кешишьян, Е. В. Хекерт // Журнал Университета водных коммуникаций. — 2012. — № 2. — С. 99–102.
11. *Возницкий И. В.* Судовые двигатели внутреннего сгорания: в 2 т. / И. В. Возницкий, А. С. Пунда. — М.: Моркнига, 2008. — Т. 2. — 470 с.
12. *Кучеров В. Н.* Проверка корректности программ тренажеров «Dieselsim» и построение ограничительных характеристик по тепловой напряженности дизелей / В. Н. Кучеров // Вестник морского государственного университета. — 2016. — № 74. — С. 114–118.

13. Кучеров В. Н. Условия охлаждения и повышение надежности цилиндропоршневой группы судовых малооборотных дизелей: дис. ... канд. техн. наук / Владимир Никанорович Кучеров. — Л.: ЛВИМУ им. адм. С. О. Макарова, 1986. — 331 с.

14. Кучеров В. Н. Работа дизеля по швартовной характеристике / В. Н. Кучеров // Вестник морского государственного университета. Серия: Судостроение и судоремонт. — 2015. — № 69. — С. 45–50.

15. Гаврилов В. С. Техническая эксплуатация судовых дизельных установок / В. С. Гаврилов, С. В. Камкин, В. П. Шмелев. — М.: Транспорт, 1975. — 295 с.

REFERENCES

1. Sobolenko, Anatoliy Nickolaevich, Yuriy Alekseevich Korneychuk, and Dmitry Konstantinovich Glazyk. "Summary of the operation practice of marine engine-room simulators." *Vestnik of Astrakhan State Technical University. Series: Marine Engineering and Technologies 2* (2016): 59–69.

2. *Mezhdunarodnaya konvetsiya o podgotovke, diplomirovanii i nesenii vakhty moryakov (PDMNV-78/95)*. SPb.: ZAO TsNIIMF, 1996.

3. *Mezhdunarodnyi kodeks po upravleniyu bezopasnost'yu (MKUB) i rukovodstva po ego vypolneniyu*. SPb.: ZAO TsNIIMF, 2014.

4. Vagabov, I. I., A. N. Sobolenko, and Y. A. Korneychuk. "Diesel Simulator as Unique Means for Bringing of Marine Engineers' Competence in Conformity with the Requirements of the STCW 95 Convention." *Proc. of 5th Intern. Conf. on Engine Room Simulators (Singapore, 25-26 June 2001)*. Singapore Polytechnic and Maritime Academy, 2001. 158–166.

5. Sobolenko, A. N. "Obobshchenie opyta trenazherno podgotovki sudomekhanikov." *Materialy i doklady Mezhdunarodnoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii «Fundamental'nye issledovaniya okeanotekhniki i morskoi infrastruktury: Teoriya. Eksperiment. Praktika»*. Komsomol'sk-na-Amure, 2015. 200–203.

6. Sobolenko, A. N., and D. K. Glazuk. "Improvement of efficiency and fail-safety of marine engines by means of their operators' simulator training." *Fisheries 1* (2014): 12–14.

7. Kongsberg Maritime. Web. 3 Apr. 2018 <www.km.kongsberg.com/>.

8. Safin, I. V., and K. L. Obertyur. "Analiz opyta i tekhnologii organizatsii trenazherno podgotovki po povysheniyu kompetentsii inzhenerno-tekhnicheskogo personala sudna na urovne upravleniya v predreisoviy period." *Sudovye energeticheskie ustanovki 28* (2011): 92–98.

9. Dorogan', O. I., V. M. Ryaben'kii, and A.O. Ushkarenko. "Credstva po etapnoi podgotovki spetsialistov po ekspluatatsii sudovogo oborudovaniya." *Naukovii visnik Khersons'koï derzhavnoi mors'koï akademii 1* (2014): 85–93.

10. Boran-Keshish'yan, A. L., and E. V. Khekert. "Reliability of ergatic components of marine simulation training systems." *Zhurnal Universiteta vodnykh kommunikatsii 2* (2012): 99–102.

11. Voznitskii, I. V., and A. S. Punda. *Sudovye dvigateli vnutrennego sgoraniya*. Vol. 2. M.: Morkniga, 2008.

12. Kucherov, V.N. "Proverka korrektnosti programm trenazherov «Dieselsim» i postroenie ogranichitel'nykh kharakteristik po teplovoi napryazhennosti dizelei." *Vestnik morskogo gosudarstvennogo universiteta 74* (2016): 114–118.

13. Kucherov, V. N. *Usloviya okhlazhdeniya i povyshenie nadezhnosti tsilindroporshnevoi gruppy sudovykh malooborotnykh dizelei*. PhD diss. L.: LVIMU im. adm. S. O. Makarova, 1986.

14. Kucherov, V. N. "Rabota dizelya po shvartovnoi kharakteristike." *Vestnik morskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Sudostroyeniye i sudoremont 69* (2015): 45–50.

15. Gavrilov, V. S., S. V. Kamkin, and V. P. Shmelev. *Tekhnicheskaya ekspluatatsiya sudovykh dizel'nykh ustanovok*. M.: Transport, 1975.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Кучеров Владимир Никанорович — кандидат технических наук, профессор ФГБОУ ВО «Морской государственный университет имени адмирала Г. И. Невельского» 690003, Российская Федерация, г. Владивосток, ул. Верхнепортовая, д.50а
 e-mail: Nadezkin@msun.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Kucherov, Vladimir N. — PhD, professor
 G.I. Nevelskoy Maritime State University
 50a Verkhneportovaya Str., Vladivostok, 690003,
 Russian Federation
 e-mail: Nadezkin@msun.ru

Статья поступила в редакцию 24 мая 2018 г.
 Received: May 24, 2018.

ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ КОМПЛЕКСЫ И СИСТЕМЫ

DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-4-818-827

THE INVESTIGATION OF OPERATION PULSE VOLTAGE REGULATOR FOR SUPPLYING CATHODIC PROTECTION OF OFFSHORE RIGS

S. Yu. Trudnev, A. O. Shuvaeva

Kamchatka State Technical University, Petropavlovsk-Kamchatsky, Russian Federation

The structure of work of the device allowing to provide cathodic protection of oil platforms and constructions is considered. The existing system of pulse cathodic protection is improved, new circuit decisions which allow to provide uninterrupted operation of giving of electric energy in system of a protected construction are offered and to increase service life of power supplies and all system as the whole. The urgency of the offered device is proved by imperfection of maintained systems of protection on the oil platforms extracting hydrocarbonic raw materials, lying down under an ocean floor, the sea or other water space. Corrosion of metal parts of a sea platform is natural spontaneous process, to stop which or completely to supervise it is practically impossible. Many scientists such as Garaev I.G., Anashkin A.A., Chuljuchkin V.V. and many other in their works have reflected a considerable quantity of variants of perfection of systems, but any of them has not developed the independent automated system which is not requiring service. Therefore a question of perfection of systems of protection against corrosion of metal constructions of sea platforms till now remains opened and actual. The offered system will provide protection against aggressive influence of the sea environment of oil metal constructions and platforms. One of the vulnerable parts of system of protection is the source of uninterrupted giving by electric energy on which constancy of a signal quality of cathodic protection depends also. Accordingly, authors offer to improve a source of electric energy of cathodic protection. Visually to present work of the offered scheme, authors of article offer to create computer model in program MATLAB. For creation of separate blocks of computer model the review of the mathematical equation describing work of a power part of a pulse voltage stabilizer is executed. The mathematical model of work of a pulse voltage stabilizer on which input the store is connected capacitor is developed. The block diagramme of a pulse voltage stabilizer and equivalent circuit of intervals of time when the stabilizer transistor is in an open condition is developed. On the basis of mathematical model the imitating model of the offered device in program MATLAB is developed and investigated. Teamwork of a pulse voltage stabilizer and the capacitor store is considered, characteristics of dependence of pressure of the category from an operating time are investigated.

Keywords: corrosion, model, voltage, capacitive storage, voltage stabilizer, capacity.

For citation:

Trudnev, Sergey Yu., and Alena O. Shuvaeva. "The investigation of operation pulse voltage regulator for supplying cathodic protection of offshore rigs." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 10.4 (2018): 818–827. DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-4-818-827.

УДК 621.311:629.12

ИССЛЕДОВАНИЕ РАБОТЫ ИМПУЛЬСНОГО СТАБИЛИЗАТОРА НАПРЯЖЕНИЯ ДЛЯ ПИТАНИЯ КАТОДНОЙ ЗАЩИТЫ МОРСКИХ ПЛАТФОРМ

С. Ю. Труднев, А. О. Шуваева

ФГБОУ ВО «КамчатГТУ», Петропавловск-Камчатский, Российская Федерация

Рассмотрена структура работы устройства, позволяющего обеспечить катодную защиту нефтяных платформ и сооружений. Усовершенствована существующая система импульсной катодной защиты, предложены новые схемные решения, которые позволят обеспечить бесперебойность подачи электрической энергии в систему защищаемого сооружения и увеличить срок службы источников питания и всей

системы в целом. Актуальность предложенного устройства обоснована несовершенством эксплуатируемых систем защиты нефтяных платформ, добывающих углеводородное сырье, залегающее под дном океана, моря или иного водного пространства. Коррозия металлических частей морской платформы является естественным самопроизвольным процессом, остановить который или полностью контролировать практически невозможно. Отечественные ученые, такие как И. Г. Гараев, А. А. Анашкин, В. В. Чулючкин и многие другие в своих трудах отразили большое количество вариантов совершенствования систем, но ни один из них не разработал автономную автоматизированную систему, не нуждающуюся в обслуживании. Поэтому вопрос совершенства систем защиты от коррозии металлических сооружений морских платформ до сих пор остается открытым и актуальным. Предлагаемая система обеспечит защиту от агрессивного влияния морской среды нефтяных металлических сооружений и платформ. Одной из наиболее уязвимых частей системы защиты является источник бесперебойной подачи электрической энергии, от постоянства сигнала которой зависит и качество катодной защиты. В связи с этим авторами предлагается усовершенствовать источник электрической энергии катодной защиты. Чтобы наглядно представить работу предлагаемой схемы, авторами статьи предлагается создать компьютерную модель в программе MATLAB. Для создания отдельных блоков компьютерной модели выполнен обзор математических уравнений, описывающих работу силовой части импульсного стабилизатора напряжения. Разработана математическая модель работы импульсного стабилизатора напряжения, на вход которого подключен емкостной накопитель. Разработана структурная схема импульсного стабилизатора напряжения и схема замещения интервалов времени, когда транзистор стабилизатора находится в открытом состоянии. На основании математической модели разработана и исследована имитационная модель предлагаемого устройства в программе MATLAB. Рассмотрена совместная работа импульсного стабилизатора напряжения и емкостного накопителя, исследованы характеристики зависимости напряжения разряда от времени работы.

Ключевые слова: коррозия, модель, напряжение, емкостной накопитель, стабилизатор напряжения, емкость.

Для цитирования:

Труднев С. Ю. Исследование работы импульсного стабилизатора напряжения для питания катодной защиты морских платформ / С. Ю. Труднев, А. О. Шуваева // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2018. — Т. 10. — № 4. — С. 818–827. DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-4-818-827.

Введение (Introduction)

При разработке и внедрении в производство оборудования, изделий, сооружений и конструкций различного типа значительную роль играет их коррозионная стойкость. Коррозия на морских месторождениях ежегодно приводит к значительным убыткам. Основной ущерб, причиняемый коррозией, заключается в огромной стоимости изделий, которые подвергаются данному виду разрушения, и стоимости проведения восстановительных операций. Увеличение срока между восстановительными операциями за счет совершенствования технической части источника бесперебойной подачи электрической энергии для поддержания работы устройства катодной защиты является главной целью данной статьи.

Ведущими специалистами в области судостроения, а также научными школами под руководством отечественных Заслуженных деятелей науки: А. А. Фатхуллина, И. Г. Гараева [1], А. А. Анашкина [2] и В. В. Чулючкина [3] регулярно проводятся исследования по совершенствованию системы катодной защиты от коррозии морских платформ. Поэтому работы, направленные на модернизацию системы катодной защиты, остаются актуальными.

В рамках данной статьи были поставлены следующие задачи:

1. Проанализировать существующие системы катодной защиты, имеющие автономный источник питания и выявить недостатки.
2. На основе проведенного анализа разработать структурную усовершенствованную схему источника питания.
3. Разработать и исследовать компьютерную модель источника питания катодной защиты.
4. Провести анализ полученных результатов.

Методы и материалы (Methods and Materials)

Импульсная катодная защита относится к области электрохимической защиты подземных металлических сооружений (ПМС) и используется, как правило, для защиты от почвенных коррозий [4]. Большинство современных устройств катодной защиты представляют собой катодные станции, включающие блоки автоматического регулирования электрических параметров защиты [5]. На рис. 1 представлена блок-схема предлагаемого устройства для катодной защиты металлических сооружений с автономным питанием.

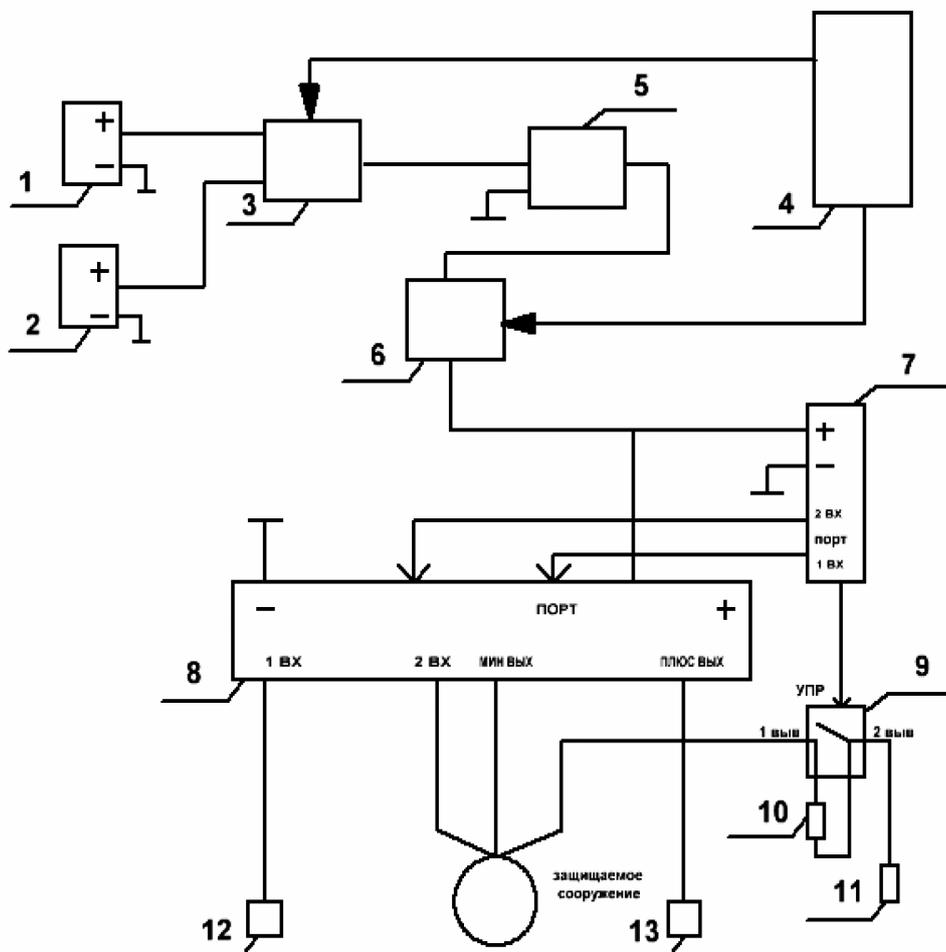


Рис. 1. Блок-схема устройства катодной защиты с автономным питанием и ионисторным модулем

Устройство содержит: блок автономного источника питания, состоящий из ветрогенератора 1 и волновой электростанции 2; блок регулирования тока заряда 3, связанного с управляющим микроконтроллером 4; блок контроля работы генератора высокочастотных колебаний — импульсный модулятор 5; систему стабилизации напряжения 6; блок управления резервом 7; блок формирования амплитуды импульсов 8; размыкатель 9; резистор 10; протектор 11; электрод сравнения 12; анодный заземлитель 13. В качестве питающего элемента системы выступает ионисторный модуль, состоящий из суперконденсаторов, который имеет ряд преимуществ по сравнению с аккумулятором, а именно:

- 1) отсутствие изнашиваемых химических элементов;
- 2) большое количество циклов заряда и разряда;
- 3) большие токи отдачи;
- 4) суперконденсаторы достаточно быстро заряжаются (практически моментально — зависит от того, какой ток может обеспечить зарядное устройство);

5) суперконденсаторы намного меньше обычных конденсаторов и в то же время имеют намного большую емкость;

б) широкий рабочий диапазон температур (от -50 до $+50$ °С).

При использовании ионисторного модуля в системе необходима установка стабилизатора напряжения, который обеспечивает постоянный стабильный питающий электрохимический потенциал защищаемого сооружения, поддерживающийся, как правило, в пределах $0,85 - 1,15$ В. Также стабилизатор сглаживает скачки и небольшие колебания питающего напряжения.

По принципу функционирования стабилизаторы напряжения делятся на следующие виды:

- феррорезонансные;
- сервоприводные (электродинамические и электромеханические);
- ступенчатые (релейные);
- электронные.

В основе функционирования феррорезонансных стабилизаторов заложен эффект феррорезонанса, который обеспечивает постоянное регулирование напряжения на выходе. В настоящее время применение данного вида стабилизаторов ограничено из-за слишком высокой стоимости.

Стабилизаторы напряжения сервоприводного типа базируются на трансформаторе вариационном, который через первичную обмотку соединен с бустерным. Подключенная к входящему напряжению и нагрузке вторичная обмотка обеспечивает необходимое выходное напряжение. Достоинством сервоприводных стабилизаторов является невысокая цена, небольшая погрешность на выходе и плавность регулировки.

Ступенчатые приборы работают по принципу контроля напряжения с автотрансформатора через электронные коммутаторы, которые управляются микропроцессорными схемами. Релейные коммутаторы самые дешевые, но имеют много недостатков: они недолговечны, не обеспечивают необходимой точности и быстродействия, несовместимы с электронной техникой и т. д.

Электронные стабилизаторы симисторного типа на микропроцессорной схеме управления, где в качестве ключей применяются симисторы или тиристоры, характеризуются быстродействием, высокой точностью стабилизации, отсутствием шума, непрерывностью напряжения, неискаженной синусоидой и длительным сроком службы [6]. В обобщенном виде стабилизатор напряжения — это регулирующий компонент, подсоединяемый параллельно нагрузке [7].

Предлагается в среде *Matlab R2014a* исследовать выходные характеристики импульсного стабилизатора постоянного напряжения с широтно-импульсной модуляцией (ШИМ), на вход которого подключен нелинейный сигнал разряда суперконденсатора. На рис. 2 приведена структурная схема подключения ионисторного модуля и импульсного стабилизатора постоянного напряжения (ИСН). Силовая часть стабилизатора состоит из полевого транзистора VT , сглаживающего фильтра и активной нагрузки R_H .

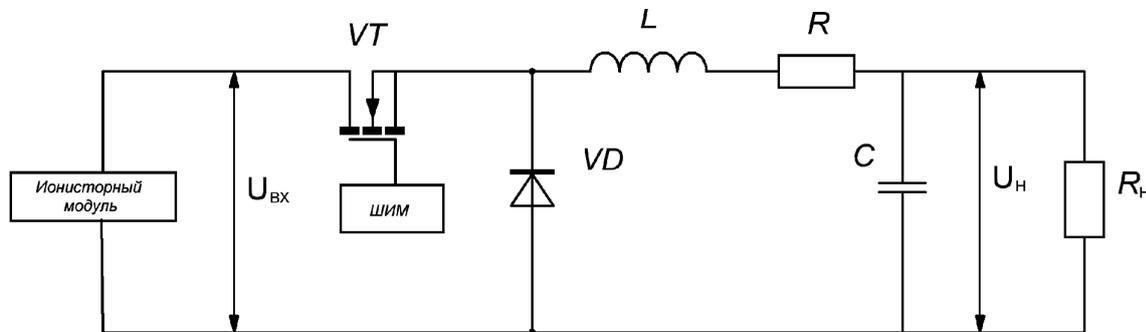


Рис. 2. Структурная схема подключения ионисторного модуля и импульсного стабилизатора постоянного напряжения

Полевой транзистор VT работает в двух ключевых режимах: открытом и закрытом. В момент открытия регулирующего транзистора VT входное напряжение $U_{ВХ}$ первичного источника,

которым является ионисторный модуль, поступает на вход сглаживающего фильтра. Ток протекает через первичный источник, дроссель и нагрузку, так как полупроводниковый диод VD не пропускает ток в другую сторону. В закрытом состоянии транзистора VT напряжение на входе сглаживающего фильтра отсутствует. Через полупроводниковый диод VD проходит ток, который поддерживается за счет накопленной энергии в дросселе.

Система управления транзистором содержит ШИМ, определяющий режим переключения транзистора с периодом T и относительной длительностью открытого состояния [8]. Для получения математической модели стабилизатора напряжения необходимо применить *метод усреднения переменных для линейных моделей*. Для этого заменим значения пульсирующего напряжения и тока значениями, средними за период. Такая модель дает результаты с малыми отклонениями от установившегося режима. Допустим, что в ИСН установился периодический процесс с периодом T и относительной длительностью замкнутого состояния ключа [9]. Различают три положения ключа для данного периодического процесса, которые представлены на рис. 3.

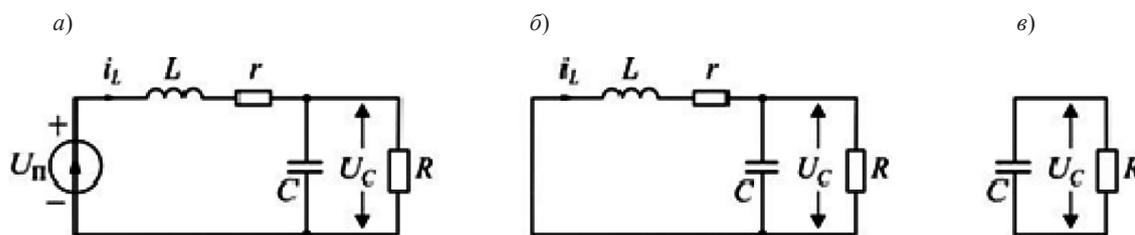


Рис. 3. Схемы замещения ИСН:

a — ключ замкнут; *b* — ключ разомкнут и $i_L > 0$;
в — ключ разомкнут и $i_L = 0$

Схема замещения ИСН для интервалов времени, когда транзистор VT находится в открытом состоянии, показана на рис. 3, *a*. Уравнения силовой части ИСН в переменных состоянии в этом случае имеют вид [10]:

$$\frac{di_L}{dt} = -\frac{r}{L}i_L - \frac{1}{L}U_c + \frac{1}{L}U_n; \quad (1)$$

$$\frac{dU_c}{dt} = \frac{1}{C}i_L - \frac{U_c}{RC}. \quad (2)$$

Для интервалов времени, когда транзистор VT закрыт, схемы замещения представлены на рис. 3, *b* и *в*, соответственно, для $i_L > 0$ и $i_L = 0$. При $i_L > 0$ уравнения силовой части ИСН в переменных состоянии принимают вид:

$$\frac{di_L}{dt} = -\frac{r}{L}i_L - \frac{1}{L}U_c; \quad \frac{dU_c}{dt} = \frac{1}{C}i_L - \frac{U_c}{RC}. \quad (3)$$

В ИСН процесс описывается уравнением, представленным для случая, если $i_L = 0$

$$\frac{dU_c}{dt} = -\frac{U_c}{RC}. \quad (4)$$

Исключив из уравнений (3) и (4) ток дросселя i_L , можно получить уравнения типа «вход-выход» силовой части ИСН:

– при открытом транзисторе

$$\frac{d^2U_c}{dt^2} + a_1 \frac{dU_c}{dt} + a_0 U_c = b_0 U_n; \quad (5)$$

– при закрытом транзисторе

$$\frac{d^2U_c}{dt^2} + a_1 \frac{dU_c}{dt} + a_0 U_c = 0. \quad (6)$$

Здесь $a_1 = \frac{LC_r}{RLC}$; $a_0 = \frac{R+L}{RLC}$; $b_0 = \frac{1}{LC}$.

Объединив уравнения (5), (6) и заменив входное напряжение в виде импульсов со средним значением, получим

$$\overline{\overline{U}} = \gamma U_n, \quad (7)$$

где U_n — относительная длительность открытого состояния транзистора.

Получим

$$\frac{d^2U_c}{dt^2} + a_1 \frac{dU_c}{dt} + a_0 U_c = \overline{\overline{U}}. \quad (8)$$

По уравнению (8) найдём передаточную функцию силовой части ИСН:

$$W_c(s) = \frac{U_c}{U_n} = \frac{b_0}{s^2 + a_1 s + a_0}. \quad (9)$$

На рис. 4, а изображена операторно-структурная схема модели силовой части ИСН с ШИМ. Схема содержит два нелинейных элемента. ШИМ, который преобразует напряжения управления U_y в относительную длительность, представлен звеном с насыщением, а уравнение (7) — элементом умножения.

а)

б)

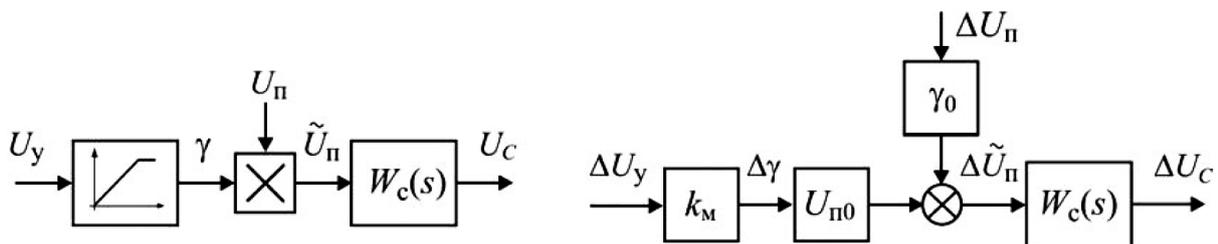


Рис. 4. Структура моделей ШИМ и силовой части ИСН:
 а — нелинейная модель; б — линеаризованная модель

Таким же образом необходимо произвести линеаризацию нелинейных элементов. Для этого входные и выходные переменные нелинейных элементов запишем в приращениях относительно их значений в установившемся режиме:

$$\Delta\gamma = \gamma - \gamma_0; \quad (10)$$

$$\Delta U_n = U_n - U_{n0}; \quad \Delta \overline{\overline{U}} = \overline{\overline{U}} - \overline{\overline{U}}_{n0}. \quad (11)$$

Линеаризованные уравнения ШИМ и элемента умножения имеют вид:

$$\Delta\gamma = k_m \Delta U_y; \quad (12)$$

$$\Delta \tilde{U}_n = U_{n0} \cdot \Delta\gamma + \gamma_0 \cdot \Delta U_n. \quad (13)$$

Операторно-структурная схема линеаризованной модели силовой части ИСН с ШИМ представлена на рис. 4, б [11]. Для верификации совместной работы ИСН и ионисторного модуля в программе *Matlab* была разработана компьютерная модель (рис. 5) согласно предложенной структурной схеме (см. рис. 2).

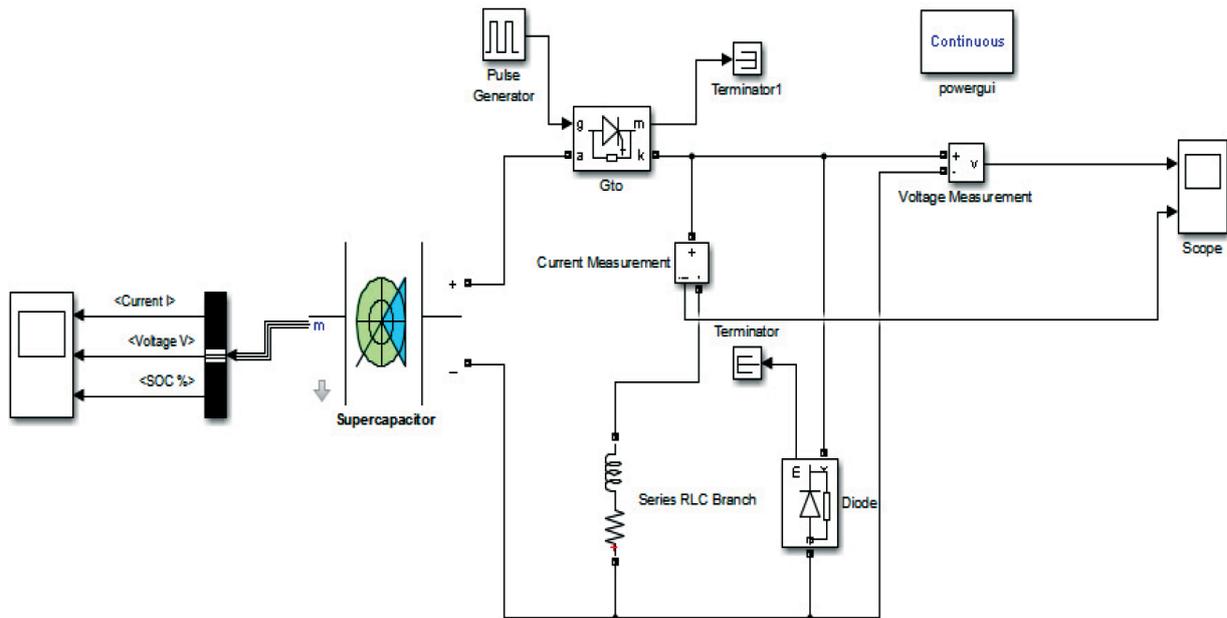


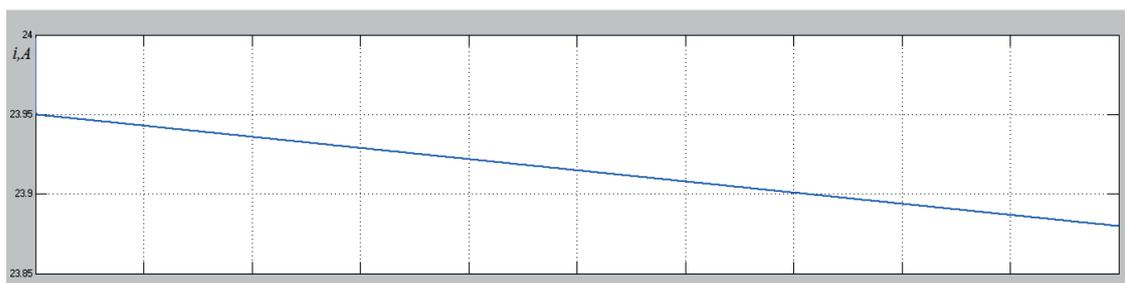
Рис. 5. Компьютерная модель ИСН в программе Matlab

Был проведен следующий эксперимент: на вход ИСН был подключен ионистор емкостью $C = 3000 \text{ Ф}$ и номинальным напряжением $U = 27 \text{ В}$, имитирующий десять последовательно подключенных ионисторных батарей. Для этой цели может быть использован ионистор *Maxwell BCAP3000P270K04*. Устройство для катодной защиты с автономным питанием содержит в качестве блока формирования амплитуды импульсов импульсную катодную станцию с максимальной амплитудой выходного напряжения 24 В .

Результаты (Results)

В результате эксперимента был получен ряд зависимостей на входе и на выходе ИСН (рис. 6 и 7).

а)



б)

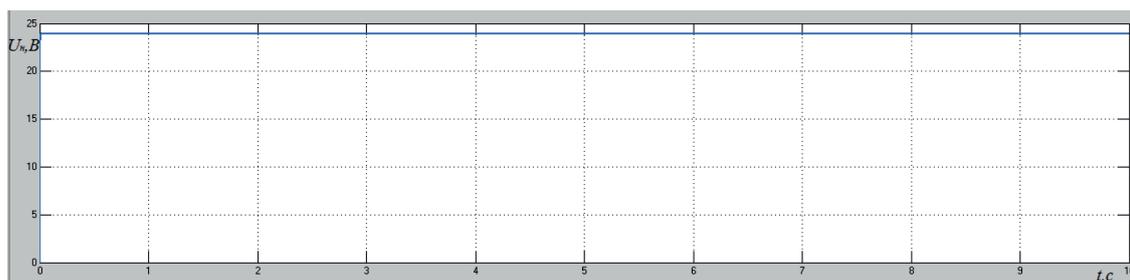


Рис. 6. Зависимость выходного тока с транзистора:

а — значение тока $i(t)$; б — значение выходного напряжения стабилизатора $U_n(t)$

По выходным характеристикам ионистора (см. рис. 7) видно, что с течением времени напряжение снижается на 0,1 В, так как ионистор разряжается и отдает энергию для поддержания работы ИСН.

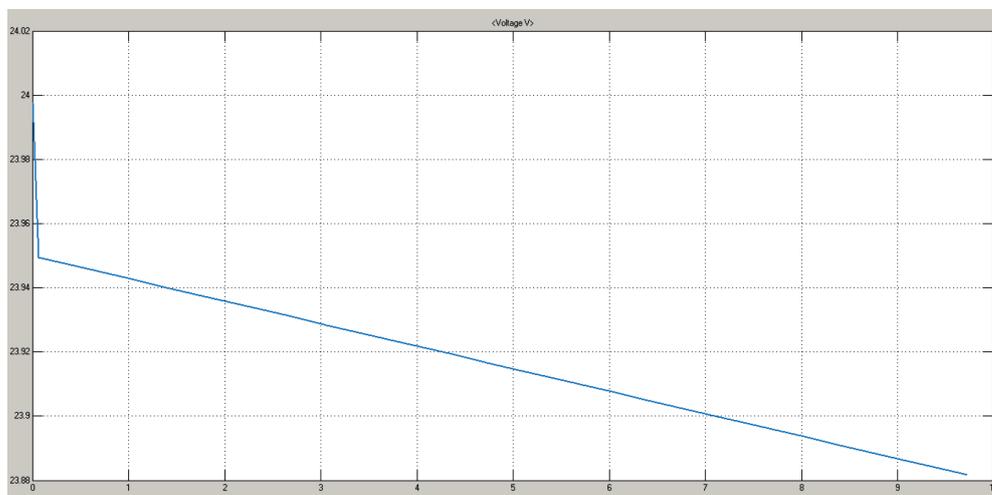


Рис. 7. График зависимости выходного напряжения разряда ионистора от времени $U(t)$

Значение выходного напряжения стабилизатора остается на заданном уровне $U = 24$ В (см. рис. 6). Поддержание напряжения стабилизатором напряжения на заданном уровне осуществляется за счет снижения выходного тока транзистора.

Обсуждение (Discussion)

На основании вышеизложенного можно сделать вывод о том, что ионисторный модуль в комплексе со стабилизатором напряжения способен обеспечить станцию катодной защиты напряжением 24 В. С помощью внедрения в систему катодной защиты таких устройств, как ионистор, который позволяет обеспечить основным и резервным питанием всю систему в целом, и стабилизатора напряжения, который позволяет получить необходимое выходное напряжение, был выявлен факт снижения выходного тока транзистора, и, как следствие, поддержания напряжения на заданном уровне.

Сопоставив существующее устройство импульсной катодной защиты с автономным питанием А. А. Анашкина и устройство катодной защиты, описанное в данной статье, можно сделать вывод о том, что принципиальным отличием является наличие аккумулятора вместо ионисторного модуля в схеме А. А. Анашкина.

На основе ранее изложенного можно сделать вывод о том, что ионистор имеет ряд существенных преимуществ по сравнению с аккумулятором. Поэтому наличие аккумулятора в системе катодной защиты металлических сооружений влечет большие финансовые и административные затраты в обслуживании по сравнению с системами катодной защиты, в структуру которых входит ионисторный модуль.

Выводы (Summary)

1. Полученный источник электрической энергии будет иметь стабильный выходной электрический сигнал и по сравнению с существующими аналогами обладает следующим рядом преимуществ:

- широкий температурный диапазон (способен сохранять работоспособность до -60 °С);
- высокий срок эксплуатации;
- низкие массогабаритные показатели;
- отсутствие необходимости постоянного обслуживания.

2. Для верификации полученных результатов в дальнейшем необходимо разработать испытательный макет предлагаемого устройства, исследование которого позволит в полной мере объективно оценить работоспособность предлагаемого технического решения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Фатхуллин А. А. Новые перспективные материалы для анодов катодной защиты от коррозии / А. А. Фатхуллин, И. Г. Гараев // Вестник Казанского технологического университета. — 2014. — Т. 17. — № 8. — С. 296–299.
2. Пат. 2011133651 Российская Федерация, МПК С23F 13/00. Устройство для импульсной катодной защиты / А. А. Анашкин, В. В. Чулючкин; заяв. и патентообл. Анатолий Александрович Анашкин. — № 2011133651/02; заявл. 11.08.2011; опубл. 20.02.2013, Бюл. № 5.
3. Пат. 2011133653 Российская Федерация, МПК С23F 13/00. Устройство для катодной защиты с автономным питанием / А. А. Анашкин, В. В. Чулючкин; заяв. и патентообл. Анатолий Александрович Анашкин. — № 2011133653/02; заявл. 11.08.2011; опубл. 20.02.2013, Бюл. № 5.
4. ГОСТ 9.602-2005. Единая система защиты от коррозии и старения: Сооружения подземные: Общие требования к защите от коррозии. — М.: Стандартинформ, 2006. — 55 с.
5. Зайнуллин Р. С. Оценка технического состояния и ресурса нефтегазохимического оборудования / Р. С. Зайнуллин, А. Г. Гумеров, А. Г. Халимов. — М.: Недра, 2004. — 286 с.
6. Скуридин Н. Н. Определение оптимальных режимов работы станций катодной защиты системы электрохимической защиты магистральных трубопроводов / Н. Н. Скуридин, А. А. Кузнецов, Д. А. Неганов, С. Ю. Глушков // Наука и технологии трубопроводного транспорта нефти и нефтепродуктов. — 2011. — № 4. — С. 90–94.
7. Импульсный стабилизатор напряжения с пропорционально-интегральным регулятором: метод. указания к выполнению лаб. работы для студентов, обучающихся по направлениям: 210100 «Электроника и нанoeлектроника» и 201000 «Биотехнические системы и технологии» / сост. О. С. Вадутов. — Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2014. — 10 с.
8. Никулин С. А. Оптимизация режимов установок электрохимической защиты / С. А. Никулин, Е. Л. Карнавский // Системы управления и информационные технологии. — 2014. — Т. 57. — № 3. — С. 64–68.
9. Ермаков А. В. Разработка и испытания композиционных анодных заземлителей для электрохимической защиты от коррозии / А. В. Ермаков [и др.] // Территория Нефтегаз. — 2013. — № 11. — С. 30–37.
10. Кочешкова Л. Г. Модель исследования электронной и ионной проводимостей в системе катодной защиты / Л. Г. Кочешкова [и др.] // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. — 2013. — № 9. — С. 88–90.
11. Белоусов И. В. Сравнительный анализ методов широтно-импульсной модуляции / И. В. Белоусов, В. Ф. Самосейко, Л. М. Бровцинова // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2018. — Т. 10. — № 2. — С. 420–429. DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-2-420-429.

REFERENCES

1. Fatkhullin, A.A., and I.G. Garaev. "Novye perspektivnye materialy dlya anodov katodnoi zashchity ot korrozii." *Vestnik Kazanskogo tekhnologicheskogo universiteta* 17.8 (2014): 296–299.
2. Anashkin, A.A., and V.V. Chulyuchkin. RU 2011 133 651 A, IPC C 23 F 13/00. Ustroistvo dlya impul'snoi katodnoi zashchity. Russian Federation, assignee. Publ. 20 Feb. 2013.
3. Anashkin, A.A., and V.V. Chulyuchkin. RU 2011 133 653 A, IPC C 23 F 13/00. Ustroistvo dlya katodnoi zashchity s avtonomnym pitaniem. Russian Federation, assignee. Publ. 20 Feb. 2013.
4. Russian Federation. State Standard GOST 9.602-2005. Edinaya sistema zashchity ot korrozii i stareniya: Sooruzheniya podzemnye: Obshchie trebovaniya k zashchite ot korrozii. M.: Standartinform, 2006.
5. Zainullin R.S., Gumerov A.G., Halimov A.G. Estimation of a technical condition and a resource oil and gas chemical the equipment - M: Nedra, 2004.

6. Skuridin, N.N., A.A. Kuznetsov, D.A. Neganov, S.Y. Glushkov. "Determining optimal operating modes of cathodic protection stations used in electrochemical protection systems of main pipelines." *Science & Technologies: Oil and Oil Products Pipeline Transportation* 4 (2011): 90–94.

7. Vadutov, O.S. *Impul'snyi stabilizator napryazheniya s proporsional'no-integral'nyim regulyatorom: metod. ukazaniya k vypolneniyu lab. raboty dlya studentov, obuchayushchikhsya po napravleniyam 210100 «Elektronika i nanoelektronika» i 201000 «Biotekhnicheskie sistemy i tekhnologii»*. Tomsk: Izdatel'stvo Tomskogo politekhnicheskogo universiteta, 2014.

8. Nikulin, S.A., and E.L. Karnavskii. "Optimizatsiya rezhimov ustanovok elektrokhimicheskoi zashchity." *Sistemy upravleniya i informatsionnye tekhnologii* 57.3 (2014): 64–68.

9. Ermakov, A.B., C.B. Nikiforov, M.S. Igumnov, E.S. Studenok, V.A. Popov, V.A. Zhelobetskii, and A.B. Popov. "Razrabotka i ispytaniya kompozitsionnykh anodnykh zazemlitelei dlya elek-trokhimicheskoi zashchity ot korrozii." *Territoriya Neftegaz* 11 (2013): 30–37.

10. Kocheshkova, L.G., D.V. Suvorov, V.V. Palashov, and M.A. Kocheva. "Model' issledovaniya elektronnoi i ionnoi provodimostei v sisteme katodnoi zashchity." *International journal of applied and fundamental research* 9 (2013): 88–90.

11. Belousov, Igor V., Veniamin F. Samosejko, and Ludmila M. Brovtsinova. "Comparative analysis of the pulse width modulation methods." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admiral S. O. Makarova* 10.2 (2018): 420–429. DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-2-420-429.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Труднев Сергей Юрьевич —
кандидат технических наук
ФГБОУ ВО « КамчатГТУ»
683980, Российская Федерация,
г. Петропавловск-Камчатский, ул. Ключевская, 35
e-mail: trudnev@mail.ru
Шуваева Алена Олеговна — аспирант
Научный руководитель:
Пюкке Георгий Александрович —
доктор технических наук, профессор
ФГБОУ ВО « КамчатГТУ»
683980, Российская Федерация,
г. Петропавловск-Камчатский, ул. Ключевская, 35
e-mail: alena.kozyrkova@gmail.com

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Trudnev, Sergey Yu. —
PhD
Kamchatka State Technical University
35 Kluchevskaia Str., Petropavlovsk-Kamchatsky,
683980, Russian Federation
e-mail: trudnev@mail.ru
Shuvaeva, Alena O. — Postgraduate
Supervisor:
Pykke Georgy Aleksandrovich
Kamchatka State Technical University
35 Kluchevskaia Str., Petropavlovsk-Kamchatsky,
683980, Russian Federation
e-mail: alena.kozyrkova@gmail.com

Статья поступила в редакцию 27 июня 2018 г.

Received: June 27, 2018.

MODELING OF THE SYSTEM OF ENERGY EFFICIENT CONTROL OF THE ELECTRICAL PROPULSION INSTALLATION WITH HOMOPOLAR MACHINES

A. Yu. Rumyantsev

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

When considering electrical propulsion installations, the prospects for their development are shown through the development of the energy and shipbuilding industries. Two directions of perspective development of rowing electric installations are allocated. This is the use of homopolar machines with superconducting windings as main generators and propulsion motors and ensuring high energy efficiency of sea-going vessels through the use of optimal control by the criterion of minimum losses. The advantage of propulsion systems made according to the generator-engine (G – E) scheme with homopolar machines with the use of optimal control is shown. An analytical expression for the energy loss is obtained when it is transferred from the primary thermal engine to the propulsion motor and propeller, depending on the state variables of the propulsion system. Graphical dependences of the power losses on the armature current of the machines are presented for various values of the generator armature rotation speed and for various engine armature rotation speeds. A dynamic model of the diesel-electric propulsion system with homopolar machines is generated. The synthesis of optimal variable state controllers for controlling the speed of rotation of the motor armature has been made. For this purpose, the control actions on the propulsion diesel-electric installation, which are optimal for the energy loss criterion, are determined for a fixed value of the engine's rotation speed. A block diagram of the optimal control system for a rowing diesel-electric installation has been constructed for setting the screw speed. Modeling of dynamic processes is carried out, transitional characteristics of state variables of the system are obtained, graphs of the behavior of losses in transient regimes are presented. The effectiveness of the application of optimal control systems in rowing electrical installations using homopolar machines is shown.

Keywords: electric propulsion installation with homopolar machines, energy efficient control, power loss, optimal regulator of the state of the propulsion system, criterion for minimizing energy losses, efficiency of constructing optimal control systems.

For citation:

Rumyantsev, Aleksey Yu. "Modeling of the system of energy efficient control of the electrical propulsion installation with homopolar machines." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 10.4 (2018): 828–840. DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-4-828-840.

УДК 62-503.56

МОДЕЛИРОВАНИЕ СИСТЕМЫ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОГО УПРАВЛЕНИЯ ГРЕБНОЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ УСТАНОВКОЙ С УНИПОЛЯРНЫМИ МАШИНАМИ

А. Ю. Румянцев

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

При рассмотрении гребных электрических установок показана перспективность их развития благодаря развитию энергетической и судостроительной областей промышленности. Выделены два направления перспективного развития гребных электрических установок: использование в качестве главных генераторов и гребных электродвигателей униполярных машин со сверхпроводниковыми обмотками и обеспечение высокой энергетической эффективности морских судов за счет применения оптимального управления по критерию минимума потерь. Показано преимущество гребных установок, выпол-

ненных по схеме генератор – двигатель (Г – Д) с униполярными машинами с применением оптимального управления. Получено аналитическое выражение потерь энергии при передаче ее от первичного теплового двигателя к гребному электродвигателю и винту в зависимости от переменных состояния гребной электрической установки. Представлены графические зависимости потерь мощности от тока якорей машин при различных значениях скорости вращения якоря генератора и при различной скорости вращения якоря двигателя. Сформирована динамическая модель гребной дизель-электрической установки с униполярными машинами. Произведен синтез оптимальных регуляторов переменных состояния для управления скоростью вращения якоря двигателя. Для этого определены оптимальные по критерию потерь энергии управляющие воздействия на гребную дизель-электрическую установку при фиксированном значении скорости вращения якоря двигателя. Построена структурная схема системы оптимального управления гребной дизель-электрической установкой при задании скорости винта. Проведено моделирование динамических процессов, получены переходные характеристики переменных состояния системы, представлены графики поведения потерь в переходных режимах. Показана эффективность применения оптимальных систем управления в гребных электрических установках с применением униполярных машин.

Ключевые слова: гребная электрическая установка с униполярными машинами, энергоэффективное управление, зависимости потерь мощности, оптимальный регулятор переменных состояния гребной электрической установки, критерий минимизации потерь энергии, эффективность построения оптимальных систем управления.

Для цитирования:

Румянцев А. Ю. Моделирование системы энергоэффективного управления гребной электрической установкой с униполярными машинами / А. Ю. Румянцев // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2018. — Т. 10. — № 4. — С. 828–840. DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-4-828-840.

Введение (Introduction)

В составе движительного комплекса судна в настоящее время получили широкое применение гребные электрические установки (ГЭУ). Такие установки обеспечивают выработку и передачу электроэнергии на движитель судна, включая в свой комплекс различные сочетания первичных тепловых двигателей, генераторов, электрических преобразователей, гребных электродвигателей, механических преобразователей, движителей, систем управления, регулирования, а также различных видов защит и блокировок. Стремительное развитие отраслей энергетической и судостроительной промышленной отрасли требует появления новых перспективных видов ГЭУ, которые должны отвечать требованиям высокой маневренности и энергоэффективности [1] – [4].

Одним из направлений развития ГЭУ является использование в качестве главных генераторов и гребных электродвигателей (ГЭД) униполярных машин, в том числе со сверхпроводниковыми обмотками, которые имеют хорошие массогабаритные характеристики и легко управляются [5] – [7]. В то же время задачей проектирования современной ГЭУ является обеспечение высокой энергетической эффективности судна [8] – [11]. Исходя из этого и учитывая то, что мощность современной ГЭУ достигает 95 % от мощности электростанции судна, необходимо учитывать распределение потерь энергии в энергетическом балансе при передаче и распределении мощности от первичного теплового двигателя (дизеля) к движителю (винту). В этом направлении развития большое преимущество получают гребные установки, выполненные по схеме Г – Д с униполярными машинами. Такие системы не имеют мощных электрических преобразователей в цепи главного тока — якоря электрических машин (рис. 1), что открывает неограниченные возможности для реализации ГЭУ большой мощности. При этом управление униполярными машинами осуществляется в цепи обмоток намагничивания. Кроме того, появляется возможность регулирования оборотов первичного теплового двигателя, что позволяет применить оптимальное управления по критерию минимума потерь путем воздействия одновременно не только на электрические машины, но и на тепловой двигатель. Все это в совокупности приводит к существенной результативности по снижению потерь энергии, снижению расхода топлива и повышению энергоэффективности судна в целом.

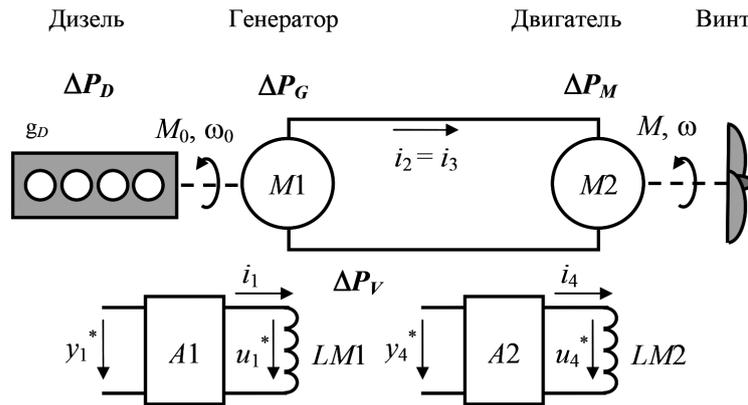


Рис. 1. Схема гребной дизель-электрической установки с униполярными машинами

Методы и материалы (Methods and Materials)

Электрическая технология передачи энергии от двигателя к движителю достаточно сложна. При формировании электромагнитного момента гребного электродвигателя M (см. рис. 1) в канале преобразования его от дизеля к винту возникают следующие потери мощности:

ΔP_D — потери в дизеле (тепловом двигателе);

ΔP_G — потери в генераторе;

ΔP_V — потери в преобразователе;

ΔP_M — потери в гребном электродвигателе.

Данные потери также являются функцией следующих переменных состояния ГЭУ:

M_0 — момента на валу дизеля;

ω_0 — скорости вращения дизеля и якоря (ротора) генератора;

i_1 — тока возбуждения генераторной установки;

i_2, i_3 — токов нагрузки генераторной установки и гребного электродвигателя соответственно;

i_4 — тока возбуждения гребного электродвигателя;

M — момента на валу гребного электродвигателя и винта;

ω — скорости вращения якоря (ротора) гребного электродвигателя и винта;

g_D — удельного расхода топлива на Ватт мощности (кг/Вт).

Целью энергоэффективного (оптимального по критерию потерь энергии) управления ГЭУ является максимально эффективная передача произведенной мощности от двигателя к движителю винту с минимальными потерями электроэнергии в целом. Это возможно, если рассматривать ГЭУ как единую систему с множеством переменных управления, каждая из которых настроена на свой оптимум, обеспечивая критерий оптимальности минимума потерь, но сохраняя значение выходной целевой функции, а именно: электромагнитного момента или скорости гребного двигателя. Эта величина определяется исходя из условий эксплуатации и задается оператором или системой управления более высокого уровня.

Передача энергии от дизеля к винту с целью создания электромагнитного момента решается неоднозначно. Одно и то же значение электромагнитного момента ГЭД может быть получено при различных сочетаниях переменных состояния ГЭУ [12], [13]. Решение данной задачи связано с определенными сложностями. Полученная оптимальная зависимость управления в большинстве случаев не имеет аналитического решения для нелинейных систем, решение даже для линейных систем может быть получено только численными методами [14] и только для квадратичного критерия качества. Формирование динамики по корням характеристического уравнения не дает желаемых динамических процессов. Корневые методы дают желаемые динамические процессы и, соответственно, субъективно лучшую динамику, но не решают задачи оптимального управления.

Предлагается решение задачи оптимального управления ГЭУ следующим образом. Рассмотрим ГЭУ как динамическую систему, которая описывается вектором дифференциальных уравнений:

$$pX = f(U, X_1, X_2), \quad (1)$$

где U — вектор управляющих воздействий; $X = X_1 \cup X_2$ — вектор переменных состояния; $X_1 \in X$ — вектор с размерностью вектора U , переменные состояния которого доступны для наблюдения; $X_2 \in X$ — дополнение вектора X_1 до вектора X .

Методами параллельной или / и последовательной коррекции для каждой подсистемы сформируем динамику с желаемыми динамическими процессами регуляторами W_p таким образом, чтобы статическая ошибка равнялась нулю:

$$\Delta X_1 = X_{1\text{опт}}^0 - K_{\text{OC}} \cdot X_1 = 0. \quad (2)$$

Выбор параметров регуляторов может быть выполнен с использованием корневых методов. Будем полагать, что переходная характеристика желаемого динамического процесса может быть аппроксимирована экспоненциальной функцией (рис. 2). При этом входные переменные $X_{1\text{опт}}^0$ будут задавать выходные переменные X_1 .

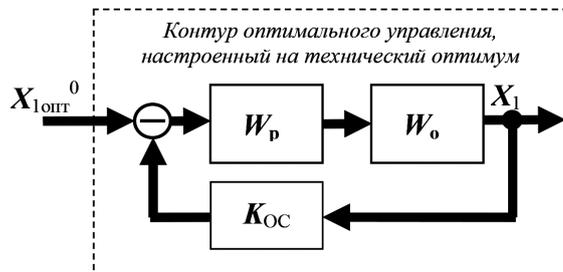


Рис. 2. Формирование желаемых переходных характеристик СЭЭС с СЭД методами последовательной коррекции:

W_o — передаточная функция объектов управления подсистем;
 W_p — передаточная функция регулятора; K_{OC} — вектор пропорциональной обратной связи

В результате формирования желаемого динамического поведения подсистем исходная система дифференциальных уравнений примет вид

$$pX = f_0(X_{1\text{опт}}^0, X_1, X_2), \quad (3)$$

где $X_{1\text{опт}}^0$ — вектор новых управляющих воздействий, задающих статические значения переменных состояния X_1 .

Для определения оптимальных управляющих воздействий $X_{1\text{опт}}^0$ должна быть сформирована функция оптимального управления. Под функцией оптимальности будем понимать потери энергии при ее передаче от двигателя к движителю:

$$\Delta P(X_{11}, X_{12}, X_2). \quad (4)$$

Положим, что задача управления ГЭУ состоит в формировании заданного значения целевой функции (скорость винта или момента на валу):

$$M = f_M(X_{11}), \quad (5)$$

которая является функцией переменных состояния $X_{11} \in X_1$ на пространстве переменных состояния которые доступны для наблюдения X_1 . Дополнение вектора X_{11} до вектора X_1 обозначим X_{12} : $X_{11} \cup X_{12} = X_1$.

Из выражения (5) можно найти один из элементов вектора X_{11} , например,

$$x_1 = M f_M^{-1}(X_{11}'), \quad (6)$$

где X'_{11} — вектор X_{11} без элемента x_1 ; f_M^{-1} — функция, обратная f_M .

Используя введенные обозначения, переформируем функцию оптимального управления (4) в следующий вид:

$$\Delta P(M f_M^{-1}(X'_{11}), X'_{11}, X_{12}, X_2) = DP_M(M, X'_1, X_2), \quad (7)$$

где ΔP_M — функция оптимального управления с учетом заданного значения целевой функции M ; X'_1 — вектор X_1 без элемента x_1 .

В стационарном режиме система уравнений (3) примет вид

$$0 = f_{\text{опт}}(X_{\text{опт}}^0, X_1, X_2).$$

Из данного уравнения с учетом отсутствия статической ошибки в управлении выразим вектор $X_2 = f_2(X_{\text{опт}}^0, X_1)$ и подставим в выражение функции оптимального управления (3). В результате получим функцию в следующем виде:

$$\Delta P_M(M, X'_1), f_2(X_1) = \Delta P_A(M, X'_1). \quad (8)$$

Найдем минимум функции потерь в пространстве, заданном вектором переменных состояния X'_1 . Для этого выполним дифференцирование по элементам вектора X'_1 . В результате получим вектор производных:

$$\Delta P_A = \frac{\partial \Delta P_A(M, X'_1)}{\partial X'_1}. \quad (9)$$

Положим, что существует вектор X'_1 , который обращает элементы вектора производных ΔP_A в ноль:

$$\Delta P_A = \frac{\partial \Delta P_A(M, X'_1)}{\partial X'_1} = 0. \quad (10)$$

Тогда в пространстве, заданном вектором X'_1 существует оптимальное состояние, минимизирующее функцию оптимального управления (8). В этом случае вектор управляющих воздействий $X_{\text{опт}}^{0'} = X'_1$ находится путем решения уравнения

$$\frac{\partial \Delta P_A(M, X_{\text{опт}}^{0'})}{\partial X_{\text{опт}}^{0'}} = 0, \quad (11)$$

где $X_{\text{опт}}^{0'}$ — вектор $X_{\text{опт}}^0$ без элемента x_1^0 (элемент x_1^0 может быть найден из выражения (6)).

Решение уравнения дает вектор оптимальных значений управляющих воздействий $X_{\text{опт}}^0 = f(M, X_1)$. Таким образом, в системе с оптимальным управлением формируется оптимальный регулятор:

$$W_{\text{опт}} = \frac{X_{\text{опт}}^0}{f(M, X_1)}. \quad (12)$$

В итоге система оптимального управления имеет вид рис. 3.

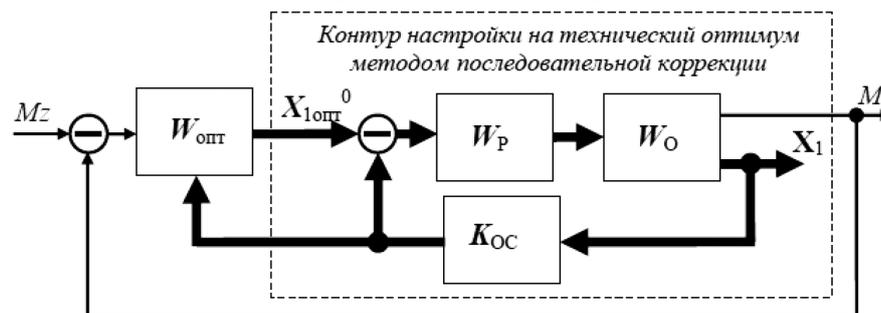


Рис. 3. Система оптимального управления динамической системой: W_o — передаточная функция объекта управления; $W_{\text{опт}}$ — передаточная функция оптимального регулятора; $K_{\text{ос}}$ — вектор пропорциональной обратной связи; M_z — заданное значение целевой функции M ; $X_{\text{опт}}^0$ — вектор оптимальных управляющих воздействий

Данный метод построения оптимального управления в ГЭУ судна позволяет найти и сформировать управляющие воздействия каждой подсистемы, которые в целом минимизируют функцию оптимального управления и поддерживают заданное значение целевой функции. При этом переход от одного оптимального состояния системы к другому происходит по желаемым динамическим процессам, которые протекают с заданным перерегулированием и максимальным быстродействием. Способ применим также для формирования оптимального управления в кусочно-линейных динамических системах.

Результаты (Results)

В данном рассматриваемом случае при оптимальном управлении значения переменных состояния определяются так, чтобы минимизировать критерий управления, а именно суммарные потери в элементах, участвующих в передаче энергии от дизеля к винту: $\Delta P = \Delta PD + \Delta PG + \Delta PV + \Delta PM$. Минимум критерия находится в области переменных состояния системы управления ГЭУ в целом. При этом переменные состояния связаны между собой заданным электромагнитным моментом. При поиске экстремума используются связи между переменными состояниями, определенные уравнениями [15] – [17] и математическими моделями электропривода ГЭУ, описывающими динамику системы. Таким образом, функция потерь мощности ΔP имеет экстремумы на переменных состояниях.

Для ГЭУ с униполярными машинами (см. рис. 1) функция потерь мощности принимает следующий вид:

$$\begin{aligned} \Delta P^* = & \omega^* \cdot L_{34}^* M^* / (L_{34}^* i_2^*) \cdot i_2^* \cdot (g_D^* \cdot \omega_0^* - 1) + (R_1^* \cdot ((L_{34}^* \cdot M^* / (L_{34}^* i_2^*) \cdot \omega^* - R_2^* i_2^*) / L_{12}^* \omega_0^*))^2 + \\ & + R_4^* \cdot (M^* / L_{34}^* i_2^*)^2 + R_2^* i_2^{*2} + n \Delta U^* \cdot ((L_{34}^* M^* / L_{34}^* i_2^*) \cdot \omega^* - R_2^* i_2^*) / (L_{12}^* \omega_0^*) + M^* / L_{34}^* i_2^* + \\ & + \Delta P_{\text{мех.ном}}^* \cdot \omega_2^* + \Delta P_{\text{мех.2ном}}^* \cdot \omega_0^{*2} \cdot g_D^* \cdot \omega_0^*. \end{aligned} \quad (13)$$

Здесь * — относительное значение величины; L_{34}^* , L_{12}^* — взаимная индуктивность обмоток якоря и возбуждения генератора и двигателя соответственно; $\Delta P_{\text{мех.ном}}^*$ — величина механических потерь номинального режима работы (в относительных единицах обычно не превосходит 0,015 ... 0,025).

Полученное выражение является функцией потерь мощности, имеющей экстремумы на переменных i_2^* и ω_0^* . Зависимости потери мощности от тока цепи якорей i_2^* при различных значениях скорости вращения якоря генератора ω_0^* и скорости вращения якоря гребного двигателя ω^* приведены на рис. 4.

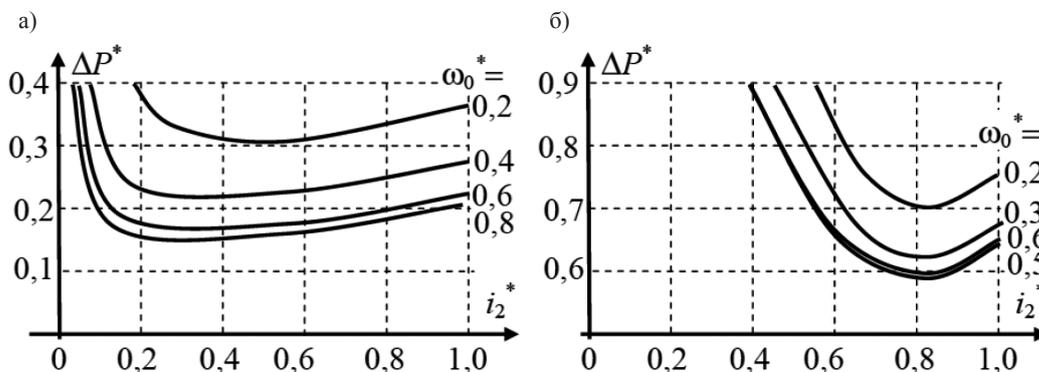


Рис. 4. Зависимости потерь мощности ΔP^* от тока якорей i_2^* : при различных значениях скорости вращения якоря генератора ω_0^* и якоря двигателя: а — $\omega^* = 0,5$; б — $\omega^* = 0,8$

Полученные из графиков результаты показывают, что во всех режимах имеется минимум функции потерь мощности, который соответствует оптимальному значению переменных

состояния ГЭУ. Решение уравнения дает вектор оптимальных значений управляющих воздействий ГЭУ и, таким образом, в системе с оптимальным управлением формируется оптимальный регулятор.

Для формирования системы оптимального управления ГЭУ необходимо сформировать динамическую модель. Динамическая модель гребной дизель-электрической установки с униполярными машинами формируется на базе динамических моделей ее элементов: дизеля, генератора-двигателя и винта [18], [19]. Структурная схема гребной дизель-электрической установки с униполярными машинами приведена на рис. 5.

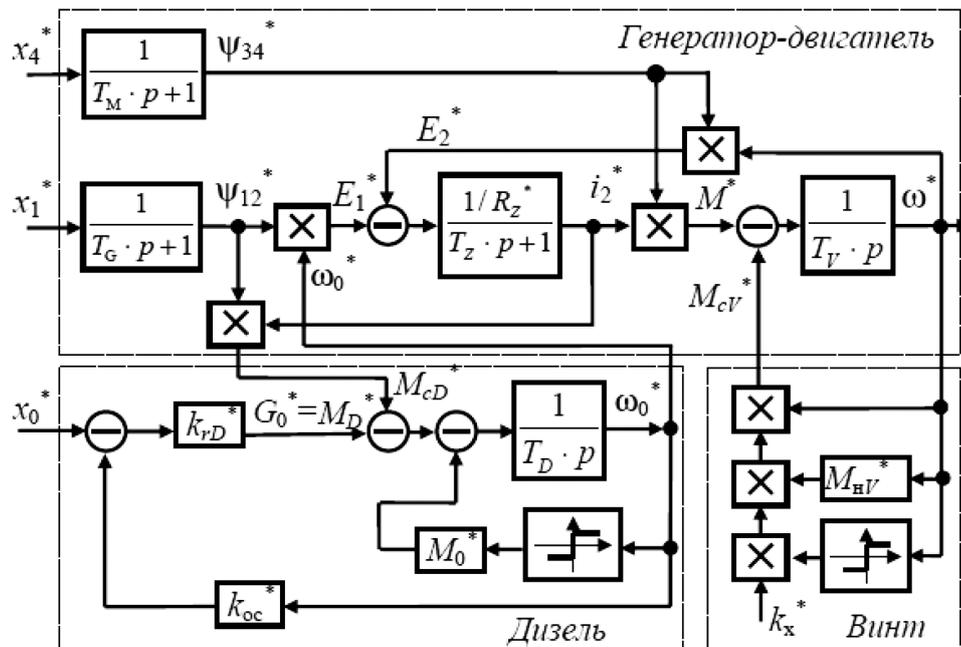


Рис. 5. Структурная схема системы дизель-генератор – двигатель-винт:
переменные x_0^* , x_1^* , x_4^* — управляющие внешним возмущающим воздействием kx^* ;
 M_{cd}^* , M_{hv}^* — моменты сопротивления дизеля и двигателя соответственно;
 ω^* — выходная (управляемая) переменная

Приведенная структурная схема позволяет моделировать динамическое поведение гребной дизель-электрической установки с униполярными электрическими машинами и синтезировать желаемые динамические процессы. Далее при моделировании производится синтез оптимальных регуляторов переменных состояния для управления скоростью вращения якоря двигателя и соответственно винта. Для этого определяются оптимальные по критерию потерь энергии управляющие воздействия на гребную дизель-электрическую установку при фиксированном значении скорости вращения якоря двигателя.

Рассмотрим синтез динамических процессов при управлении скоростью вращения винта путем воздействия на контур тока цепи якорей машин i_2^* . При этом остаются не заданными входные воздействия на контуры тока обмотки возбуждения двигателя i_4^* ($\Psi_{34}^* = L_{34}^* i_4^*$) и контур скорости вращения маховых масс дизель-генератора ω_0^* . При формировании оптимального управления ток обмотки возбуждения двигателя и скорость вращения маховых масс дизель-генератора вычисляются исходя из заданного значения скорости вращения винта. Так как ток цепи якорей машин задан управляющим воздействием x_1^* , следует сформировать оптимальные управляющие воздействия на контур тока возбуждения двигателя x_4^* и контур скорости вращения маховых масс дизеля x_0^* исходя из критерия оптимальности минимума потерь ΔP^* .

Минимум критерия достигается при выполнении равенства

$$i_{2\text{опт}}^* = \sqrt{M^*} \cdot \left(\frac{R_1^* \cdot \omega^{*2}}{R_2^* \cdot L_{12}^* \cdot \omega_0^{*2}} + \frac{R_4^*}{R_2^* \cdot L_{34}^*} \right)^{1/4} \quad (14)$$

Зная, что величина электромагнитного момента силы определяется выражением $M^* = L_{34}^* i_3^* i_4^*$, найдем ток i_4^* :

$$i_{4\text{опт}}^* = i_{2\text{опт}}^* \cdot \sqrt{\frac{R_2^* \cdot \omega_0^{*2} \cdot L_{12}^{*2}}{R_4^* \cdot L_{12}^{*2} \cdot \omega_0^{*2} + R_1^* \cdot L_{34}^{*2} \cdot \omega^{*2}}} \quad (15)$$

Значения ω^* и ω_0^* в данном выражении определяются с соответствующих датчиков, значение $i_{2\text{опт}}^*$ является задающим воздействием на контур тока якорей электрических машин.

Оптимальное управление контуром скорости вращения маховых масс дизель-генератора имеет следующий вид:

$$\omega_{0\text{опт}}^* \approx \Omega_0 \cdot \frac{\omega^2 (\omega + \Delta P_{\text{мех}2\text{ном}}^*) + [(6\Omega_0 - 3 - 2\Omega_0^2) + 3(1 - \Omega_0)^2 / (1 - g_0)] \cdot \Delta P_{\text{мех}1\text{ном}}^*}{\omega^2 (\omega + \Delta P_{\text{мех}2\text{ном}}^*) + [(8\Omega_0 - 4 - 3\Omega_0^2) + 4(1 - \Omega_0)^2 / (1 - g_0)] \cdot \Delta P_{\text{мех}1\text{ном}}^*} \quad (16)$$

При этом выполнено упрощение $R_1^* = R_2^* = R_4^* = 0$.

Структурная схема системы оптимального управления гребной дизель-электрической установкой с униполярными машинами при задании скорости винта приведена на рис. 6.

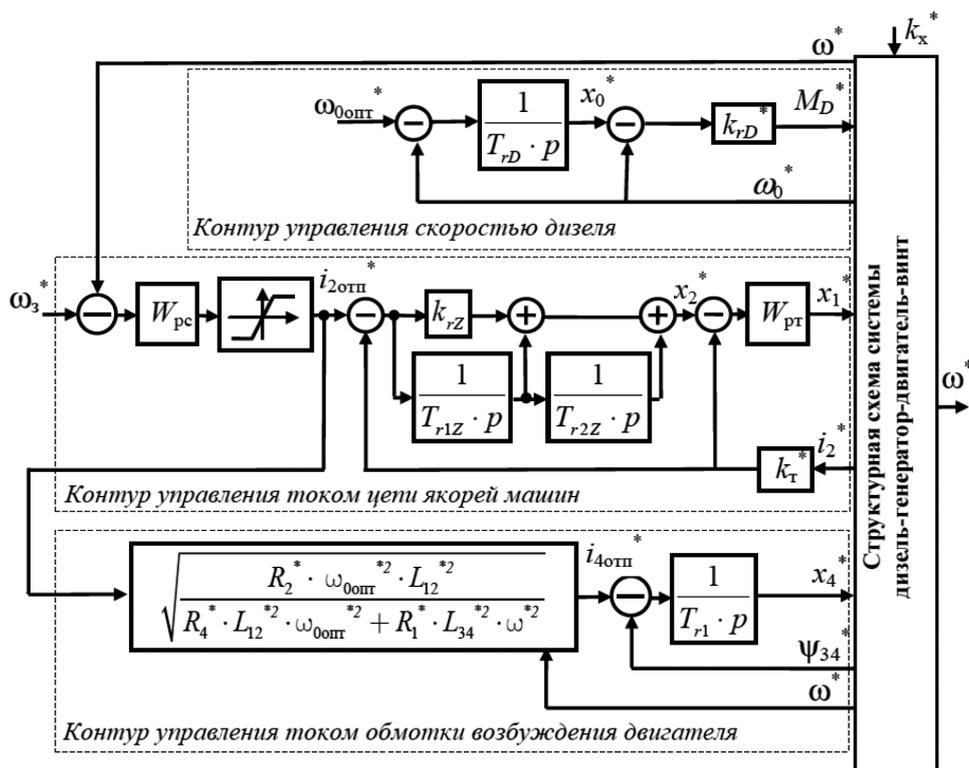


Рис. 6. Структурная схема системы оптимального управления гребной дизель-электрической установкой с униполярными машинами при задании скорости винта ω_3^*

На базе полученной системы управления была построена математическая модель с использованием технологии компьютерного моделирования динамических систем с использованием программы Simulink [20]. Получены переходные характеристики переменных состояния системы при различном значении задающего воздействия (рис. 7).

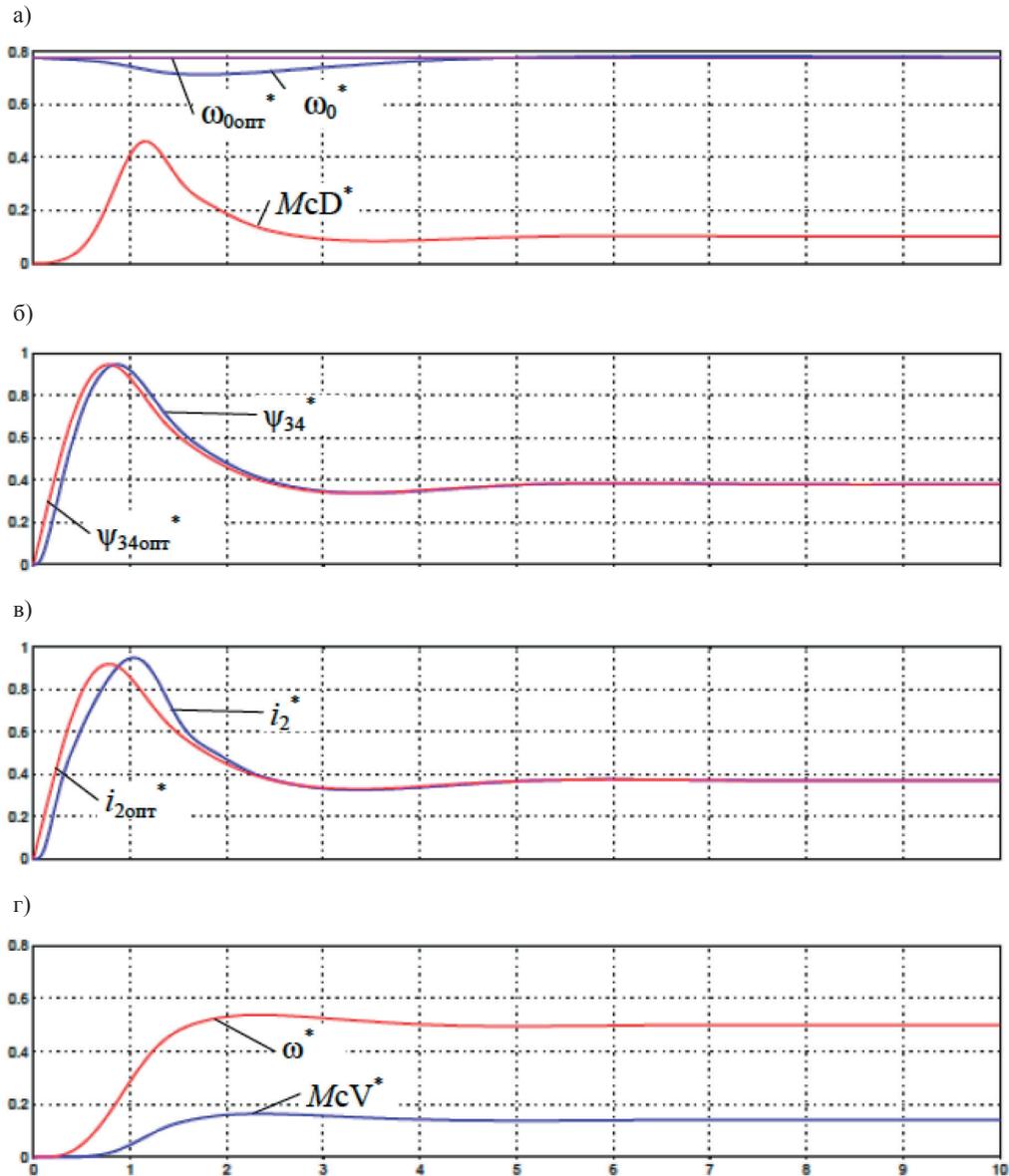


Рис. 7. Переходные характеристики переменных состояния ГЭУ с униполярными машинами $\omega_3^* = 0,5$:

a — реакция дизель-генератора; *б* — возбуждение ГЭД;

в — ток якорей униполярных машин; *г* — выходные характеристики ГЭД

Условные обозначения: $\omega_{0\text{опт}}$, ω_0 — соответственно заданная оптимальная и фактическая скорость вращения дизель-генератора; $M_c D$, $M_c V$ — соответственно моменты сопротивления на валу дизеля и на винте (валу гребного электродвигателя); $\Psi_{34\text{опт}}$, Ψ_{34} — соответственно заданное и фактическое значение потокосцепления обмотки возбуждения гребного электродвигателя;

$i_{2\text{опт}}$, i_2 — соответственно заданный и фактический ток якорей униполярных машин;

ω — скорость вращения винта (вала гребного электродвигателя)

Обсуждение (Discussion)

При анализе поведения переменных состояния системы управления ГЭУ было проведено сравнение значений потерь энергии в различных режимах управления. Режиму оптимального управления был сопоставлен режим раздельного управления, когда скорость вращения дизеля ω_0 и ток намагничивания ГЭД i_4^* поддерживаются на номинальном уровне. По результатам моделирования получены переходные характеристики потерь гребной дизель-электрической установки с униполярными машинами (рис. 6).

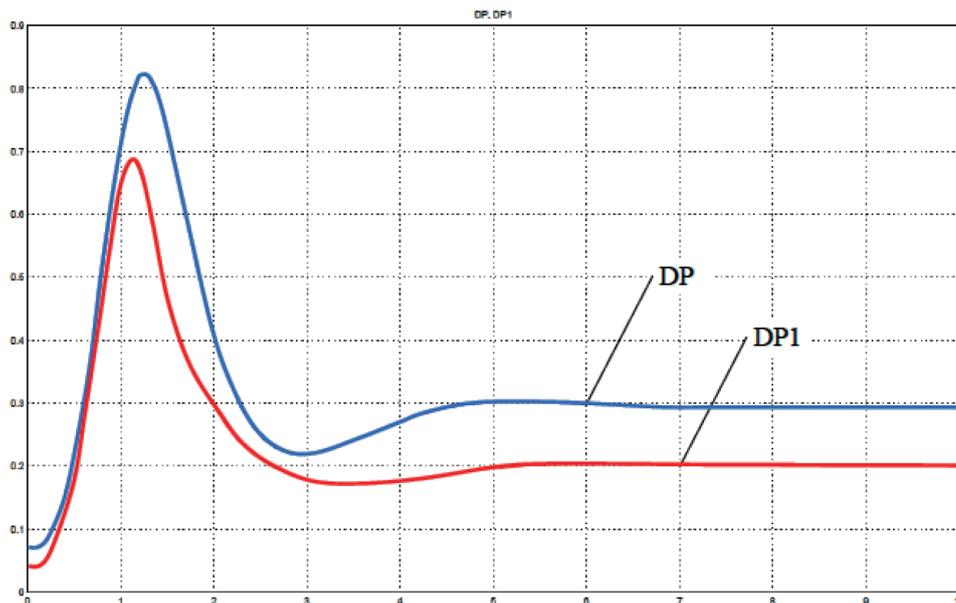
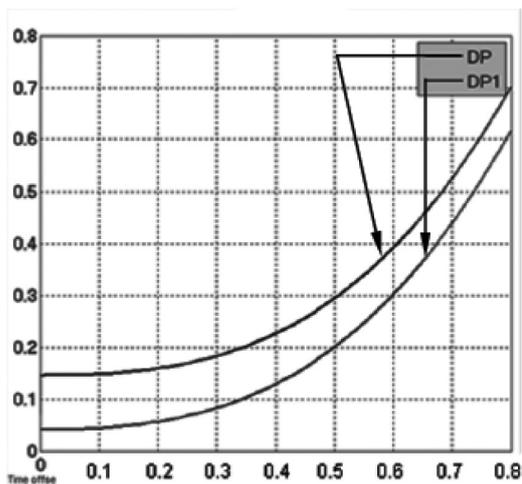


Рис. 6. Переходная характеристика потерь ГЭУ с униполярными машинами при $\omega_3^* = 0,5$:
 DP — потери при классическом раздельном управлении;
 DP1 — потери при оптимальном управлении

Аналогично была построена зависимость потерь энергии ГЭУ от скорости вращения винта в установившемся режиме (рис. 7).

а)



б)

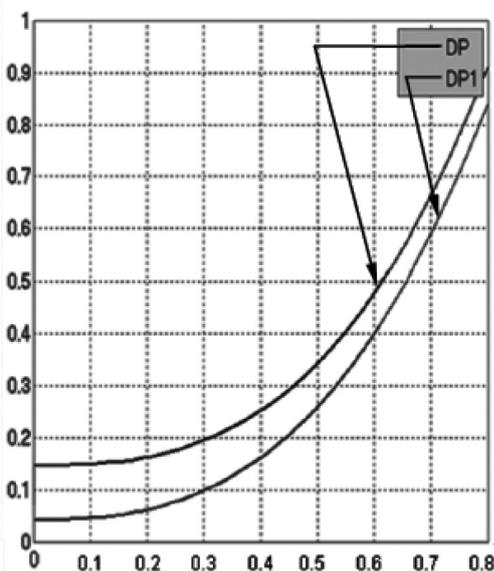


Рис. 7. Зависимость потерь от скорости вращения винта в установившемся режиме:
 а — работа винта в свободной воде; б — работа винта в швартовном режиме
 (DP — потери при раздельном управлении; DP1 — потери при оптимальном управлении)

Заключение (Conclusion)

В целом в установившихся и динамических режимах, при заданной скорости вращения винта ω менее номинальной, система оптимального управления ГЭУ поддерживает потери энергии в гребной дизель-электрической установке с униполярными машинами на минимальном уровне. При увеличении скорости вращения винта потери квадратично увеличиваются и в номинальном

режиме стремятся к единице. При этом эффективность оптимального управления сохраняется во всем диапазоне регулирования и составляет порядка 5 – 13 %, что отражает экономию энергии и топлива соответственно.

Предложенный подход показывает высокую эффективность построения и применения оптимальных систем управления по критерию минимума потерь энергии при передаче её от теплового двигателя к движителю (винту) в судовых электроэнергетических системах с системой электродвижения судна с применением униполярных машин. Перспективой развития данного подхода к синтезу оптимального управления является применение его на других типах ГЭУ и использование данного вида управления в современных судовых электроэнергетических системах, что в итоге позволит поднять энергоэффективность судов с электродвижением на более высокий уровень.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Гильмияров Е. Б.* Многокритериальный подход к выбору судовой энергетической установки / Е. Б. Гильмияров, В. В. Цветков // Вестник Мурманского государственного технического университета. — 2006. — Т. 9. — № 3. — С. 502–513.
2. *Кориунов В. Н.* Перспективы развития судовых электроэнергетических систем / В. Н. Кориунов, Т. Е. Кувшинов, А. Н. Шеин // Вологодские чтения. — 2008. — № 69. — С. 139–145.
3. *Романовский В. В.* Перспективы модернизации гребных электрических установок ледоколов / В. В. Романовский, В. С. Иванов, А. И. Лебедев // Морской вестник. — 2013. — № 2S (11). — С. 56–59.
4. *Шарашкин С. В.* Перспективы использования различных электродвигателей в гребном электроприводе / С. В. Шарашкин // Материалы VII межвузовской науч.-практ. конф. аспирантов, студентов и курсантов «Современные тенденции и перспективы развития водного транспорта России» 18 мая 2016 г. — СПб.: Изд-во ГУМРФ им. адм. С. О. Макарова, 2016. — С. 79–82.
5. *Шутова Д. И.* ВТСП устройства / Д. И. Шутова // Сверхпроводники для электроэнергетики: инф. бюл. — М.: Изд-во РНЦ «Курчатовский институт». — 2008. — Т. 5. — Вып. 3. — С. 1–2.
6. *Захарова Е. И.* Высокотемпературные сверхпроводящие электродвигательные установки для применения на флоте / Е. И. Захарова, М. А. Зингер, И. В. Захаров // Молодой ученый. — 2016. — № 28 (132). — С. 82–85.
7. *Ковалев Л. К.* Анализ состояния зарубежных и отечественных разработок по созданию сверхпроводниковых электрических машин / Л. К. Ковалев, К. Л. Ковалев, И. П. Колчанова // Электричество. — 2013. — № 1. — С. 2–12.
8. *Бровцинова Л. М.* Перспективность гребных электрических установок с униполярными машинами / Л. М. Бровцинова, В. Ф. Самосейко, А. В. Саушев, А. Ю. Румянцев // Современная наука: актуальные проблемы и пути их решения. — 2014. — № 7. — С. 37–39.
9. *Иванченко А. А.* Энергетическая эффективность судов и регламентация выбросов парниковых газов / А. А. Иванченко, А. П. Петров, Г. Е. Живлюк // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2015. — № 3(31). — С. 103–112. DOI: 10.21821/2309-5180-2015-7-3-103-112.
10. *Румянцев А. Ю.* Решение задачи оптимального управления динамической системой, обеспечивающее желаемые переходные процессы / А. Ю. Румянцев, В. Ф. Самосейко // Электротехника: сетевой электронный научный журнал. — 2015. — Т. 2. — № 4. — С. 92–94.
11. *Яровенко В. А.* Системный подход к вопросам проектирования гребных энергетических установок / В. А. Яровенко // Проблемы техники. — 2013. — № 2. — С. 82–94.
12. *Farhani F. C.* Electric drive control: multi-level optimization efficiency / F. Farhani, C. Ben Reagaya, A. Zaafouri, A. Chaari // The Fourth International Renewable Energy Congress. — 2012. — Pp. 894–898.
13. *Regaya C.B.* Loss-minimizing with backstepping technique control for induction motors and on line adaptation of the stator and rotor resistance / C.B. Regaya, A. Zaafouri, A. Chaari // Middle East Journal of Scientific Research. — 2013. — Vol. 15. — Is. 3. — Pp. 389–397.
14. *Анисимов А. А.* Формирования критерия оптимальности в задачах синтеза регуляторов состояния электромеханических систем / А. А. Анисимов, С. В. Тарарыкин // Мехатроника, автоматизация, управление. — 2009. — № 10. — С. 36–41.

15. Геча В. Я. Конструкция магнитоэлектрической униполярной микромашины / В. Я. Геча, А. Б. Захаренко, А. К. Надкин // Вопросы электромеханики. Труды ВНИИЭМ. — 2015. — Т. 146. — № 3. — С. 3–8.

16. Пугачев А. А. Минимизация мощности потерь в электроприводе со скалярной системой управления асинхронным двигателем / А. А. Пугачев // Вестник Череповецкого государственного университета. — 2015. — № 3 (64). — С. 32–37.

17. Попов А. Н. Энергосберегающие регуляторы для систем автоматизированного электропривода / А. Н. Попов // Инженерный вестник Дона. — 2016. — Т. 43. — № 4 (43). — С. 55.

18. Румянцев А. Ю. Оптимальное управление в системах электродвижения судов по критерию минимума потерь / А. Ю. Румянцев, В. Ф. Самосейко, Н. В. Белоусова // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2016. — № 6 (40). — С. 206–213. DOI: 10.21821/2309-5180-2016-8-6-206-213.

19. Саушев А. В. Параметрический синтез электротехнических устройств и систем / А. В. Саушев. — СПб.: ГУМРФ им. адм. С. О. Макарова, 2013. — 315 с.

20. Григорьев А. В. Компьютерное моделирование и исследование единой электроэнергетической системы в среде Simulink / А. В. Григорьев, Е. А. Глеклер // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2015. — № 2 (30). — С. 185–191. DOI: 10.21821/2309-5180-2015-7-2-185-191.

REFERENCES

1. Gil'miyarov, E.B., and V.V. Tsvetkov. "Mnogokriterial'nyi podkhod k vyboru sudovoi energeticheskoi ustanovki." *Vestnik Murmanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* 9.3 (2006): 502–513.

2. Korshunov, V.N., T.E. Kuvshinov, and A.N. Shein. "Perspektivy razvitiya sudovykh elektroenergeticheskikh system." *Vologdinskije chteniya* 69 (2008): 139–145.

3. Romanovskii, V.V., V.S. Ivanov, and A.I. Lebedev. "Perspektivy modernizatsii grebnykh elektricheskikh ustanovok ledokolov." *Morskoi vestnik* 2S(11) (2013): 56–59.

4. Sharashkin, S.V. "Perspektivy ispol'zovaniya razlichnykh elektrodvigateli v grebnoy elektroprivode." *Materialy VII mezhvuzovskoi nauchno-prakticheskoi konferentsii aspirantov, studentov i kursantov «Sovremennye tendentsii i perspektivy razvitiya vodnogo transporta Rossii» 18 maya 2016 goda*. SPb.: Izd-vo GUMRF im. adm. S.O. Makarova, 2016. 79–82.

5. Shutova, D. I. "HTSC DEVICES." *The Bulletin "Superconductors for power engineering"* 5.3 (2008): 1–2.

6. Zakharova, E.I., M.A. Zinger, and I.V. Zakharov. "Vysokotemperaturnye sverkhprovodyashchie elektrodvigatel'nye ustanovki dlya primeneniya na flote." *Molodoi uchenyi* 28(132) (2016): 82–85.

7. Kovalev, L.K., K.L. Kovalev, and I.P. Kolchanova. "Analiz sostoyaniya zarubezhnykh i otechestvennykh razrabotok po sozdaniyu sverkhprovodnikovyykh elektricheskikh mashin." *Elektrichestvo* 1 (2013): 2–12.

8. Brovtsinova, L.M., V.F. Samoseyko, A.V. Saushev, and A.Yu. Rummyantsev. "Prospects of rowing electrical units with unipolar cars." *Sovremennaya nauka: aktual'nye problemy i puti ikh resheniya* 7 (2014): 37–39.

9. Ivanchenko, A.A., A.P. Petrov, and G.E. Zhivlyuk. "Energy efficiency of ships and regulation of greenhouse gas emissions." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova* 3(31) (2015): 103–112. DOI: 10.21821/2309-5180-2015-7-3-103-112.

10. Rummyantsev, A.Y., and V.F. Samoseyko. "Solution of the Problem of Optimal Control of a Dynamic System that Provides the Desired Transient Response." *Russian Internet Journal of Electrical Engineering* 2.4 (2015): 92–94.

11. Yarovenko, V.A. "Sistemnyi podkhod k voprosam proektirovaniya grebnykh energeticheskikh ustanovok." *Problemi tekhniki* 2 (2013): 82–94.

12. Farhani, F.C., C. Ben Reagaya, A. Zaafouri, and A. Chaari. "Electric drive control: multi-level optimization efficiency." *The Fourth International Renewable Energy Congress* (2012): 894–898.

13. Regaya, C.B., A. Zaafouri, and A. Chaari. "Loss-minimizing with backstepping technique control for induction motors and on line adaptation of the stator and rotor resistance." *Middle East Journal of Scientific Research* 15.3 (2013): 389–397.

14. Anissimov, A.A., and S.V. Tararykin. "The Forming of Optimization Criterion in the Problems of Parametric Synthesis of the State Regulators in Electromechanical Systems." *Mekhatronika, avtomatizatsiya, upravlenie* 10 (2009): 36–41.

15. Gecha, V.Ya., A.B. Zakharenko, and A.K. Nadkin. “Konstruktsiya magnitoelektricheskoi unipolyarnoi mikromashiny.” *Voprosy elektromekhaniki. Trudy VNIIEМ* 146.3 (2015): 3–8.

16. Pugachev, A. A. “Minimizatsiya moshchnosti poter’ v elektroprivode so skalyarnoi sistemoi upravleniya asinkhronnym dvigatelem.” *Vestnik Cherepovetskogo gosudarstvennogo universiteta* 3(64) (2015): 32–37.

17. Popov, A.N. “Energy saving regulators for systems of the automated electric drive.” *Engineering journal of Don* 43.4(43) (2016): 55.

18. Rumyantsev, Alexey Yurevich, Veniamin Frantsevich Samoseiko, and Nadezhda Vladislavovna Belousova. “Optimal control of the electric propulsion systems of vessels on the criterion of minimum losses.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova* 6(40) (2016): 206–213. DOI: 10.21821/2309-5180-2016-8-6-206-213.

19. Saushev, A. V. *Parametricheskii sintez elektrotekhnicheskikh ustroystv i sistem*. SPb.: GUMRF im. adm. S. O. Makarova, 2013.

20. Grigor’ev, A.V., and E. A. Glekler. “Computer simulation and research of the integrated electric power system in Simulink.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 2(30) (2015): 185–191. DOI: 10.21821/2309-5180-2015-7-2-185-191.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Румянцев Алексей Юрьевич —
старший преподаватель
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала
С. О. Макарова»
198035, Российская Федерация, Санкт-Петербург,
ул. Двинская, 5/7
e-mail: kaf_electroprivod@gumrf.ru,
stehnika@mail.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Rumyantsev, Aleksey Yu. —
Senior Lecturer
Admiral Makarov State University of Maritime
and Inland Shipping
5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg, 198035,
Russian Federation
e-mail: kaf_electroprivod@gumrf.ru,
stehnika@mail.ru

Статья поступила в редакцию 17 июля 2018 г.

Received: July 17, 2018.

DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-4-841-856

COMBINED OPTIMAL PULSE WIDTH MODULATION ACCORDING TO THE CRITERION OF VARIANCE OF CURRENT IN PROPULSION ELECTRICAL INSTALLATIONS OF SHIPS

I. V. Belousov, V. F. Samosejko

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

An analytical approach to the quality optimization of three-phase and two-phase pulse width modulation (PWM) in a three-phase bridge circuit is considered. To assess the quality of modulation, the mean square error of current modulation for the modulation period (local variance) and for the period of the modulating function (integral variance) is used. The free variables that can be used to optimize the three-phase PWM are the pulse offset parameters relative to the center of the modulation interval and the zero-sequence signal. The free variables that can be optimized for the two-PHASE PWM are the pulse offset parameters relative to the center of the modulation interval and the shift parameter of the passive phase switching function. The analysis of current dispersion for three-phase pulse width modulation and two-phase pulse width modulation is carried out. The switching functions of optimal three-phase and two-phase pulse-width modulation are synthesized according to the criterion of current dispersion in the load. With two-phase modulation, dynamic energy losses in the valves are reduced. It is shown that the use of two-phase modulation allows to raise the modulation frequency to the level at which the energy losses in the electronic keys are the same in the two-phase and three-phase modulation. In the case of equal energy losses in electronic keys, comparison of the optimal three-phase and two-phase modulation by the criterion of current dispersion in the load shows that at high modulation frequency and the amplitude modulation coefficient of more than 0,69, the use of two-phase modulation is preferred. The analysis of the current dispersion generated by three-phase and two-phase PWM is performed. Switching functions of optimal three-phase and two-phase PWM are synthesized by the criterion of current dispersion in the load. It is shown that the optimization of the pulse displacement parameters relative to the center of the modulation interval is effective only at low modulation frequency. The efficiency of optimization of two-PHASE PWM by the parameter of shift of the passive phase switching function is small and does not exceed 7%. Two-phase modulation reduces dynamic energy losses in electronic keys. It is shown that the use of two-phase modulation allows to raise the modulation frequency to the level at which the energy losses in the keys are the same in the two-phase and three-phase PWM. Comparison of the optimal three-phase and two-phase PWM by the criterion of current dispersion in the load shows that at high modulation frequency and the amplitude modulation coefficient of more than 0.69, the use of two-phase modulation is preferred. The algorithm of combined optimal control of the frequency Converter using three-phase and two-phase modulation, the use of which leads to a significant reduction in the dispersion of currents at low modulation frequencies, is synthesized. A consequence of the reduced dispersion of current is the reduction of energy losses due to modulation and vibrating characteristics in rowing electric drives of large power.

Keywords: three-phase frequency Converter, pulse-width modulation, modulation quality, optimization, propeller motor.

For citation:

Belousov, Igor V., and Veniamin F. Samosejko. "Combined optimal pulse width modulation according to the criterion of variance of current in propulsion electrical installations of ships." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 10.4 (2018): 841–856. DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-4-841-856.

УДК 621.341.572

КОМБИНИРОВАННАЯ ОПТИМАЛЬНАЯ ШИРОТНО-ИМПУЛЬСНАЯ МОДУЛЯЦИЯ ПО КРИТЕРИЮ ДИСПЕРСИИ ТОКА В ГРЕБНЫХ ЭЛЕКТРОПРИВОДАХ

И. В. Белоусов, В. Ф. Самосейко

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

Рассмотрен аналитический подход к оптимизации качества полнофазной и неполнофазной широтно-импульсной модуляции (ШИМ) в трехфазном электронно-ключевом мосту. Для оценки качества модуляции используется среднеквадратичная ошибка модуляции по току на периоде модуляции (локальная дисперсия) и на периоде модулирующей функции (интегральная дисперсия). Свободными переменными, по которым можно вести оптимизацию трехфазной ШИМ, являются параметры смещения импульсов относительно центра интервала модуляции и функция предмодуляции. Свободными переменными, по которым можно вести оптимизацию двухфазной ШИМ, являются параметры смещения импульсов относительно центра интервала модуляции и параметр смещения коммутационной функции пассивных фаз. Выполненный анализ дисперсии тока, порождаемого трехфазной и двухфазной ШИМ, позволил синтезировать коммутационные функции оптимальной полнофазной и неполнофазной ШИМ по критерию дисперсии тока в нагрузке. Показано, что оптимизация по параметрам смещения импульсов относительно центра интервала модуляции эффективна лишь при низкой частоте модуляции. Эффективность оптимизации неполнофазной ШИМ по параметру смещения коммутационной функции пассивных фаз мала и не превышает 7%. При неполнофазной модуляции уменьшаются динамические потери энергии в вентилях. Показано, что применение неполнофазной модуляции позволяет поднять частоту модуляции до уровня, при котором потери энергии в ключах при неполнофазной и полнофазной модуляции совпадают. Сравнение оптимальной полнофазной и неполнофазной модуляции по критерию дисперсии тока в нагрузке показывает, что при высокой частоте модуляции и коэффициенте амплитудной модуляции более 0,69 предпочтительно использование неполнофазной модуляции. Синтезирован алгоритм комбинированного оптимального управления преобразователем частоты с использованием полнофазной и неполнофазной модуляции, использование которого ведет к существенному снижению дисперсии токов при низких частотах модуляции. Следствием снижения дисперсии тока является уменьшение потерь энергии от модуляции и виброшумовых характеристик в гребных электроприводах большой мощности.

Ключевые слова: трехфазный преобразователь, широтно-импульсная модуляция, качество модуляции, оптимизация, гребной электродвигатель.

Для цитирования:

Белоусов И. В. Комбинированная оптимальная широтно-импульсная модуляция по критерию дисперсии тока в гребных электроприводах / И. В. Белоусов, В. Ф. Самосейко // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2018. — Т. 10. — № 4. — С. 841–856. DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-4-841-856.

Введение (Introduction)

Управление потоками электрической энергии посредством широтно-импульсной модуляции (ШИМ) с развитием силовой электроники нашло широкое применение в различных областях техники, в частности для управления гребными электродвигателями. Качество ШИМ существенно зависит от частоты следования импульсов. Однако увеличение частоты модуляции ведет к возрастанию динамических потерь в электронных ключах. Большие частоты модуляции применяются в электрических преобразователях меньшей мощности. Мощности преобразователей электрической энергии, реализуемых на полностью управляемых электронных ключах, неуклонно растут. Так, мощность единичных преобразователей частоты, используемых в системах электродвижения судов, в настоящее время достигает 5 МВт и более. В преобразователях большой мощности частота модуляции не превышает 1 кГц.

В данной работе рассматриваются алгоритмы оптимальной ШИМ по критерию потерь энергии в электронных ключах. Применение оптимального алгоритма ШИМ повышает качество тока в нагрузке и ведет к снижению потерь мощности в гребных электродвигателях и уменьшению виброшумовых характеристик электроприводов. Поэтому повышение качества модуляции является актуальной задачей.

Методы и материалы (Methods and Materials)

Описание функционирования электронно-ключевого трехфазного моста. Управление гребными электроприводами, как правило, осуществляется трехфазными электронно-ключевыми мостами (рис.1), состоящими из трех полумостов. Полумост состоит из двух последовательно соединенных ключей: VH_X и VL_X ($X = A, B, C$). Питание электронно-ключевого моста осуществляется

от источника постоянного напряжения U_d . Общий потенциал нижних ключей и источника питания принимается равным нулю. Общий потенциал верхних ключей и источника питания принимается равным напряжению источника питания U_d . Трехфазная нагрузка представляет собой LR — фильтр низкой частоты. Нагрузка может соединяться звездой (рис. 1, а) или треугольником (рис. 1, б). Для описания функционирования полумостов используется относительное время $\tau = t/T_0$, где t — текущее время; T_0 — период модуляции. пилообразная функция $\phi = \tau - \text{floor}(\tau)$ относительного времени τ описывает относительное время, нулевое значение которого соответствует началу интервала ШИМ, а значение 1 — его концу, где $\text{floor}(\tau)$ — дробная часть числа τ .

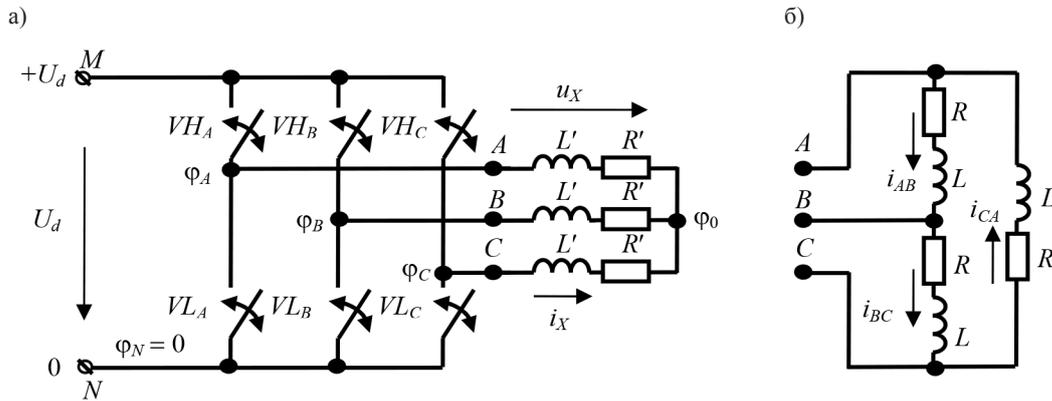


Рис. 1. Трехфазная мостовая схема при соединении нагрузки:
а — звездой; б — треугольником

Под ШИМ в данной работе понимается процесс аппроксимации желаемого гладкого потенциала Γ_x на выводах нагрузки $X = A, B, C$ импульсами потенциала $\phi_x = U_d \cdot \chi_x$ узла $X = A, B, C$, где χ_x — периодическая булева функция, принимающая значения 0 или 1 (коммутационная функция полумоста). Отношение

$$y_x = \Gamma_x / U_d \quad (1)$$

будем называть *модулирующей функцией потенциала полумоста X*. В режиме модуляции модулирующие функции полумостов должны удовлетворять неравенствам $0 \leq y_x \leq 1$. Если модулирующие функции полумостов $y_x > 1$ или $y_x < 0$, то режим работы называется *перемодуляцией*.

Полагается, что желаемые фазные напряжения на нагрузке заданы в виде гладких функций G_x . Отношение

$$g_x = G_x / U_d \quad (2)$$

называется *модулирующей функцией фазного напряжения G_x* . Модулирующая функция фазного напряжения связана с модулирующей функцией полумоста очевидным соотношением

$$y_x = g_x + \gamma_0,$$

где $\gamma_0 = \Gamma_0 / U_d$ — нулевая потенциальная функция полумоста; Γ_0 — желаемый гладкий потенциал общей точки нагрузки, соединенной звездой. Функция

$$g_0 = \gamma_0 - 1/2$$

в отечественной литературе называется *функцией предмодуляции, или сигналом нулевой последовательности*. Модулирующие функции линейного напряжения связаны с модулирующими функциями фазных напряжений соотношениями:

$$g_{XY} = g_X - g_Y = y_X - y_Y, \quad (3)$$

где $X, Y = A, B, C$ — узлы электронно-ключевого моста (см. рис. 1, а). Симметричная система модулирующих функций фазных напряжений на нагрузке должна удовлетворять соотношению

$$g_A + g_B + g_C = 0. \quad (4)$$

Обычно модулирующие функции напряжений являются синусоидальными:

$$g_A = \frac{a}{4 \cdot \sqrt{3}} \cdot \cos\left(\frac{2 \cdot \pi \cdot \tau}{f^*}\right); \quad g_B = \frac{a}{4 \cdot \sqrt{3}} \cdot \cos\left(\frac{2 \cdot \pi \cdot \tau}{f^*} - \rho\right); \quad g_C = \frac{a}{4 \cdot \sqrt{3}} \cdot \cos\left(\frac{2 \cdot \pi \cdot \tau}{f^*} + \rho\right), \quad (5)$$

где $a \in [0, 1]$ — коэффициент амплитуды модуляции; $\rho = 2\pi/3$ — угол фазового сдвига; f^* — относительная частота ШИМ, равная отношению периода модулирующей функции к периоду модуляции. Если модулирующие функции являются синусоидальными, то в режиме модуляции основная гармоника модулированного напряжения совпадает с модулирующим напряжением.

Управление полумостами $X = A, B, C$ осуществляется так, что включен либо верхний ключ VH_X , либо нижний VL_X . Импульсная булева функция χ_X является коммутационной функцией полумоста, значению $\chi_X = 1$, соответствует включенное состояние верхнего ключа полумоста X , а значению $\chi_X = 0$ — включенное состояние нижнего ключа полумоста X . Графическое представление коммутационной функции приведено на рис. 2.

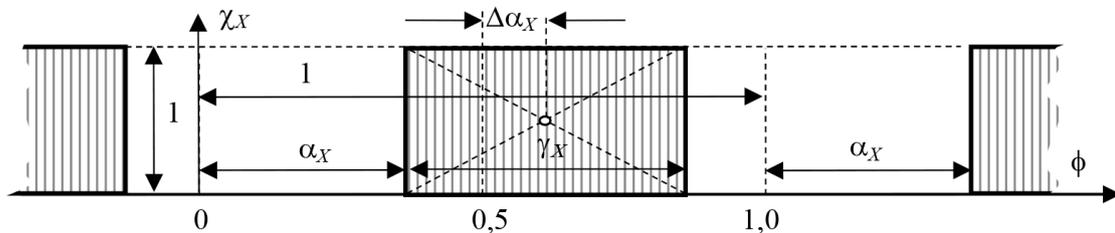


Рис. 2. График периодической импульсной функции со сдвигом импульса относительно начала интервала модуляции вправо

Формальная запись коммутационных функций полумостов $X = A, B, C$:

$$\chi_X = 1(\alpha_X + \gamma_X - \phi) \cdot 1(\phi - \alpha_X) = 1\left(\frac{1 + \gamma_X}{2} + \Delta\alpha_X - \phi\right) \cdot 1\left(\phi - \frac{1 - \gamma_X}{2} - \Delta\alpha_X\right), \quad (6)$$

где $1(x)$ — единичная функция аргумента x ; α_X — относительное время от начала интервала ШИМ до момента включения верхнего ключа полумоста X ; $\Delta\alpha_X$ — коэффициент смещения импульса относительно центра интервала ШИМ; γ_X — скважность импульсов полумоста.

Аргументы коммутационной функции γ_X и $\Delta\alpha_X$ являются управляющими переменными полумоста X и должны быть заданы. Управляющих переменных трехфазного моста шесть. Седьмой переменной является частота модуляции. Полагается, что частота модуляции задана исходя из ограничения температуры нагрева ключей при симметричной полнофазной модуляции тремя полумостами.

Так как модулирующая функция потенциала полумоста является гладкой функцией времени, ее можно представить на интервале модуляции двумя первыми слагаемыми ряда Тейлора:

$$y_X(\phi) \approx y_X(1/2) + \Delta y_X \cdot (\phi - 1/2).$$

Принцип управления ШИМ заключается в поддержании равенства

$$\int_0^1 (\chi_X - y_X(\phi)) \cdot d\phi = 0, \quad (7)$$

откуда следует, что скважность импульсов полумоста совпадает с модулирующей функцией полумоста:

$$\gamma_X = y_X(\phi) = 1/2 + g_X - g_0. \quad (8)$$

Из выражений (6), (8) и (4) следует, что свободных переменных управления полумостами — четыре: $\Delta a_A, \Delta a_B, \Delta a_C$ и g_0 , они могут быть выбраны произвольно или определены так, чтобы получить максимум качества ШИМ.

Оценка качества ШИМ выполняется по величине дисперсии тока в нагрузке. Под ошибкой модуляции по току Δi_{XY} подразумевается разность между токами, порождаемыми модулирующим напряжением i_{XY} и модулирующим напряжением j_{XY} , где $X, Y = A, B, C$ — наименования узлов электронно-ключевого моста (см. рис. 1). Под дисперсией тока понимается среднеквадратичная ошибка на заданном интервале времени. Дисперсия тока разделяется на два вида: локальная на периоде ШИМ и интегральная на периоде модулирующей функции.

Локальная дисперсия межфазного тока в трехфазном электронно-ключевом мосту при симметричной нагрузке может быть найдена по формуле

$$D_{ABC} = D(g_X, \Delta g_X, \Delta \alpha_X, g_0) = \frac{D_{AB} + D_{BC} + D_{AC}}{3}, \quad (9)$$

где $D_{AB} = \left(\frac{R}{U_d}\right) \cdot \int_0^1 \Delta i_{AB}(\phi) \cdot d\phi$; $D_{BC} = \left(\frac{R}{U_d}\right) \cdot \int_0^1 \Delta i_{BC}(\phi) \cdot d\phi$; $D_{AC} = \left(\frac{R}{U_d}\right) \cdot \int_0^1 \Delta i_{AC}(\phi) \cdot d\phi$.

Будем полагать, что функции фазных напряжений g_A, g_B, g_C образуют симметричную систему функций, которые упорядочим в порядке убывания. Возможны шесть комбинаций неравенств:

$$g_A > g_B > g_C; g_B > g_A > g_C; g_B > g_C > g_A; g_C > g_B > g_A; g_C > g_A > g_B; g_A > g_C > g_B. \quad (10)$$

Данным неравенствам соответствуют неравенства модулирующих потенциалов полумостов:

$$\gamma_A > \gamma_B > \gamma_C; \gamma_B > \gamma_A > \gamma_C; \gamma_B > \gamma_C > \gamma_A; \gamma_C > \gamma_B > \gamma_A; \gamma_C > \gamma_A > \gamma_B; \gamma_A > \gamma_C > \gamma_B.$$

Интегральная дисперсия тока может быть найдена с учетом симметрии токов нагрузки, лишь на 1/6 периода модулирующей функции, когда выполняются неравенства $g_A > g_B > g_C$:

$$ED(a, f^* | g_0) = \frac{6}{f^*} \int_0^{f^*/6} D(g_X, \Delta g_X, \Delta \alpha_X, g_0) \cdot d\tau. \quad (11)$$

Если осуществляется модуляция одного потенциала нагрузки (одним полумостом), то модуляция называется *однофазной*. Если осуществляется модуляция обоих потенциалов нагрузки (двумя полумостами), то модуляция называется *двухфазной*. В трехфазном электронно-ключевом мосту модуляция может осуществляться всеми тремя полумостами или двумя. В первом случае модуляция называется *полнофазной* (П-ШИМ), а во втором — *неполнофазной* (Н-ШИМ). В случае модуляции двумя полумостами из трех на двух фазах нагрузки осуществляется однофазная модуляция напряжения, а на третьей фазе — двухфазная.

При однофазной модуляции модулирующая функция потенциала полумоста может быть принята равной модулирующей функции напряжения на нагрузке $\gamma_{XY} = g_{XY}$, где Y — пассивная фаза. Локальная дисперсия тока при однофазной модуляции полумостом $X = A, B, C$ определяется выражением

$$D_{XY} = \frac{\delta^2}{f^{*2}} \cdot \left(\frac{g_{XY}^2 \cdot (1 - g_{XY})^2 - g_{XY} \cdot \Delta \alpha_{XY} \cdot \Delta g_{XY} \cdot (3 - g_{XY}^2 - 4 \cdot \Delta \alpha_{XY})}{12} + \gamma_{XY}^2 \cdot \Delta \alpha_{XY}^2 + \frac{\Delta g_{XY}^2}{120} \right), \quad (12)$$

где δ — отношение постоянной времени нагрузки к периоду модулирующей функции напряжения; $g_{XY} = \gamma_{XY}$ — модулирующие функции межфазных напряжений полумостов $X = A, B, C$, определенные выражением (3); Y — пассивная фаза; X — модулирующая фаза; $\Delta \alpha_{XY} = \Delta \alpha_X$ — коэффициент смещения импульса относительно центра интервала широтно-импульсной модуляции;

$\Delta g_{XY} = \frac{\partial g_{XY}}{\partial \tau}$ — приращение модулирующих функций межфазных напряжений на интервале модуляции.

Локальная дисперсия тока двухфазной модуляции определяется выражением

$$D_{XY} = \frac{\delta^2}{f^{*2}} \cdot \left(\begin{aligned} & \frac{g_{XY}^2}{12} \cdot ((1 - \gamma_X)^2 + \gamma_Y \cdot (\gamma_X + \gamma_Y - 1)) + 2 \cdot \Delta\alpha_X \cdot \Delta\alpha_Y \cdot \gamma_Y + \\ & + \Delta\alpha_X^2 \cdot (\gamma_X \cdot g_{XY} + \gamma_Y) + \Delta\alpha_Y^2 \cdot \gamma_Y \cdot (1 - g_{XY}) + \\ & + \frac{\Delta g_{XY}^2}{120} + \frac{\Delta g_{XY}}{12} \cdot (\Delta\alpha_X \cdot \gamma_X \cdot (\gamma_X - 3) + \Delta\alpha_Y \cdot \gamma_Y \cdot (\gamma_Y - 3)) \end{aligned} \right), \quad (13)$$

где γ_X, γ_Y — модулирующие функции потенциалов узлов $X, Y = A, B, C$, определенные выражением (8); $\Delta\alpha_X, \Delta\alpha_Y$ — коэффициент смещения импульсов фаз X, Y относительно центра интервала широтно-импульсной модуляции. Выражение для двухфазной дисперсии (13) справедливо при $g_X > g_Y$.

Обзор существующих методов модуляции. Свободные переменные $\Delta\alpha_A, \Delta\alpha_B, \Delta\alpha_C$ и g_0 определяют качество ШИМ. При высокой относительной частоте модуляции f^* значения Δg_X достаточно малы. В этом случае минимум дисперсий токов (12) и (13) достигается при коэффициентах смещения импульсов относительно центра: $\Delta\alpha_A, \Delta\alpha_B, \Delta\alpha_C = 0$. ШИМ, при которой смещения импульсов относительно центра равны нулю, называется *центрально-симметричной*. В существующей практике обычно используется центрально-симметричная векторная ШИМ.

Однако при низкой относительной частоте модуляции значения Δg_X достаточно велики. В этом случае для уменьшения дисперсии тока в нагрузке положение импульсов на интервале модуляции целесообразно корректировать в соответствии с динамикой изменения модулирующих функций фазных напряжений (12). ШИМ, в которой положение импульсов корректируется в зависимости от приращения модулирующих функций напряжения на периоде модуляции, далее называется *динамической* (Д-ШИМ). Коэффициенты смещения импульсов относительно центра при Д-ШИМ оцениваются выражением

$$\Delta\alpha_X = c \cdot \Delta g_X, \quad (14)$$

где c — некоторый коэффициент, определяемый так, чтобы минимизировать дисперсию тока.

Функция предмодуляции g_0 , которая относится к свободным переменным, может быть выбрана произвольно и определяет метод ШИМ. Функции предмодуляции могут быть непрерывными (без разрывов второго рода) или разрывными (с разрывами второго рода). Непрерывной функции предмодуляции соответствует П-ШИМ. Если функция предмодуляции имеет разрывы второго рода, то из процесса модуляции исключается один из полумостов и имеет место Н-ШИМ. В отечественной литературе такая модуляция называется также *ШИМ с пассивной фазой*. Методы с непрерывной функцией $g_0(\tau)$ в иностранной литературе условно записываются SPWM, а методы Н-ШИМ с разрывной (разрывы второго рода) — DPWM.

Методы П-ШИМ имеют функцию предмодуляции без разрывов второго рода, которая обеспечивает модуляцию напряжения всеми полумостами. Метод П-ШИМ при $g_0 = 0$ был впервые рассмотрен, по-видимому, в работе [1] и в отечественной литературе называется *классической ШИМ* [2]. В зарубежной литературе этот метод чаще называется *синусоидальной ШИМ* и условно обозначается SPWM [3], [4]. В данной работе ШИМ называется синусоидальной в том случае, если модулирующие функции напряжений на нагрузке синусоидальны (5). При $g_0 = 0$ и коэффициенте амплитуды модуляции $a > a_{(1)} = 0,866$ наступает режим перемодуляции. В режиме перемодуляции в составе модулированного напряжения появляются гармоники, частоты которых ниже частоты модуляции. Режим модуляции сохраняется при коэффициенте амплитуды $a > a_{(1)} = 0,866$. Значение коэффициента амплитуды $a = a_{(1)}$ на границе режимов модуляции и перемодуляции называется *граничным коэффициентом модуляции*.

Для повышения граничного коэффициента модуляции до значения $a_{(1)} = 1$ классический метод ШИМ был модифицирован [5] – [7]. В модифицированном классическом методе П-ШИМ

при синусоидальных модулирующих функциях (5) используется функция предмодуляции, которая является гармоникой третьего порядка:

$$g_0^o = \frac{a}{6 \cdot \sqrt{3}} \cdot \cos\left(\frac{6 \cdot \pi \cdot \tau}{f^*}\right),$$

где a — коэффициент амплитуды модуляции; f^* — относительная частота ШИМ, равная отношению периода модулирующей функции к периоду модуляции.

Альтернативой модифицированной классическим методом П-ШИМ считается метод векторной ШИМ, который впервые был опубликован, по-видимому, в работе [8]. В зарубежной литературе векторная ШИМ условно обозначается SVPWM и используется в большинстве практических программных реализаций. Классический и векторный методы сравниваются во многих работах, например, в исследованиях [9] – [11]. В ряде работ [12] – [14] высказывается мнение о том, что это один и тот же метод П-ШИМ, имеющий различную форму представления результата. Векторной ШИМ в терминах данной работы соответствует функция предмодуляции

$$g_0 = \frac{\max\{g_A, g_B, g_C\} + \min\{g_A, g_B, g_C\}}{2}. \quad (15)$$

Граничный коэффициент модуляции при векторной ШИМ $a_{(1)} = 1$. Методы П-ШИМ с непрерывной функцией предмодуляции обеспечивают высокое качество модуляции. В литературе [2], [3], [11], как правило, преобладает мнение, что лучшей П-ШИМ является векторная ШИМ (SVPWM). Однако исследования показывают [15], что оптимальной П-ШИМ по критерию дисперсии тока в нагрузке соответствует функция предмодуляции

$$g_0^o = \frac{3}{2} \cdot \frac{g_A \cdot g_B \cdot g_C}{g_A^2 + g_B^2 + g_C^2}. \quad (16)$$

Если положить, что модулирующие функции фазного напряжения g_X синусоидальны (5), то функция предмодуляции (16) является гармоникой третьего порядка:

$$g_0^o = \frac{a}{4 \cdot \sqrt{3}} \cdot \cos\left(\frac{6 \cdot \pi \cdot \tau}{f^*}\right). \quad (17)$$

Однако граничный коэффициент модуляции в этом случае снижается до значения $a_{(1)} = 0,972$.

Модифицированная классическая П-ШИМ с функцией предмодуляции (16) практически во всем диапазоне коэффициента амплитуды напряжения $a \in [0; 1)$ превосходит векторную ШИМ по критерию дисперсии тока в нагрузке. Однако значения дисперсий тока в нагрузке при центрально-симметричной П-ШИМ с функциями предмодуляции (13) и (16) отличаются не более чем на 2,5 %, и это отличие уменьшается с уменьшением коэффициента амплитуды модуляции a . Оптимальная Д-ШИМ при низкой относительной частоте модуляции ($f^* < 40$) по критерию дисперсии тока в нагрузке существенно превосходит векторную ШИМ. Значение коэффициента c в выражении (14) в случае П-ШИМ следует принять равным 11/96.

Методы Н-ШИМ имеют функцию предмодуляции с разрывами второго рода, которая должна обеспечивать модуляцию с одной пассивной фазой. Методы Н-ШИМ в отечественной литературе защищены авторскими свидетельствами [16] – [18]. В иностранной литературе первой публикацией, посвященной Н-ШИМ, по-видимому, является работа [19]. Методы Н-ШИМ широко обсуждаются в современной зарубежной литературе [20] – [22]. Применение Н-ШИМ позволяет уменьшить динамические потери в электронных ключах [23].

Если неравенство $0 < \gamma_X < 1$ не выполняется, то фаза X не участвует в модуляции. При $\gamma_X = 0$ коммутационная функция $\chi_X = 0$, а при $\gamma_X = 1$ — $\chi_X = 1$. Если положить, что один из ключей полумоста X включен на некотором интервале времени, то модуляция линейных напряжений осуществляется полумостами $Y \neq X$. Для линейных напряжений фаз u_{YX} модуляция будет однофазной. Для напряжения между фазами $Y, Z \neq X$ модуляция будет двухфазной. Заметим,

что применение метода Н-ШИМ не должно приводить к режиму перемодуляции. Граничный коэффициент модуляции при Н-ШИМ $a_{(1)} = 1$. Выделяются следующие несколько алгоритмов Н-ШИМ.

Алгоритм Н-ШИМ с включением верхнего ключа пассивной фазы. Если принять

$$\gamma_X = \frac{1}{2} + g_X - g_0 = 1,$$

то функция предмодуляции

$$g_0 = g_0^{\max} = g_X - \frac{1}{2}.$$

Для осуществления возможности модуляции всех фазных напряжений при включенном ключе VH_X без режима перемодуляции функция g_X должна быть выбрана так, что

$$g_X = \max\{g_A, g_B, g_C\}$$

и

$$g_0^{\max} = \max\{g_A, g_B, g_C\} - \frac{1}{2}. \quad (18)$$

Алгоритм Н-ШИМ с включением верхнего ключа пассивного полумоста. Если принять

$$\gamma_X = \frac{1}{2} + g_X - g_0 = 0,$$

то функция предмодуляции

$$g_0 = g_0^{\min} = g_X + \frac{1}{2}.$$

Для осуществления возможности модуляции всех фазных напряжений при включенном ключе VL_X без режима перемодуляции функция g_X должна быть выбрана так, что

$$g_X = \min\{g_A, g_B, g_C\}$$

и

$$g_0^{\min} = \min\{g_A, g_B, g_C\} + \frac{1}{2}. \quad (19)$$

Функции предмодуляции (18) и (19) использовать нецелесообразно, так как при использовании функции предмодуляции (18) статические потери мощности в верхних ключах окажутся больше, чем в нижних, а при использовании функции предмодуляции (19) — наоборот. Функции предмодуляции (18) и (19) определяют два несимметричных алгоритма Н-ШИМ.

Симметричные алгоритмы Н-ШИМ предусматривают чередование включений нижних и верхних ключей пассивных полумостов, что обеспечивает равномерный нагрев ключей. Для формального описания алгоритма обобщенной симметричной Н-ШИМ будем полагать, что заданы модулирующие функции фазных напряжений g_A, g_B, g_C . Из этих функций синтезируем булеву переменную (коммутационную функцию пассивного полумоста), определяющую чередование включенного состояния верхних и нижних ключей мостовой схемы (см. рис. 1):

$$x_0(\beta) = 1(g_A(\tau - f^* \cdot \beta) \cdot g_B(\tau - f^* \cdot \beta) \cdot g_C(\tau - f^* \cdot \beta)), \quad (20)$$

где $1(x)$ — единичная функция аргумента x ; τ — относительное время; β — параметр сдвига коммутационной функции пассивной фазы; f^* — относительная частота модуляции.

График булевой переменной x_0 , определяющей чередование включенного состояния верхних и нижних ключей, приведен на рис. 3. Значению $x_0(\beta) = 1$ соответствует алгоритм Н-ШИМ с включением верхнего ключа пассивной фазы, значению $x_0(\beta) = 0$ — алгоритм Н-ШИМ с включением нижнего ключа пассивной фазы. Коммутационная функция пассивной фазы $x_0(\beta)$ является периодической функцией времени, частота которой в три раза выше частоты

ты модулирующих функций напряжения. Вариация параметра сдвига β в интервале от 0 до 1/6 периода модулирующей функции исчерпывает все возможные варианты симметричной трехфазной Н-ШИМ.

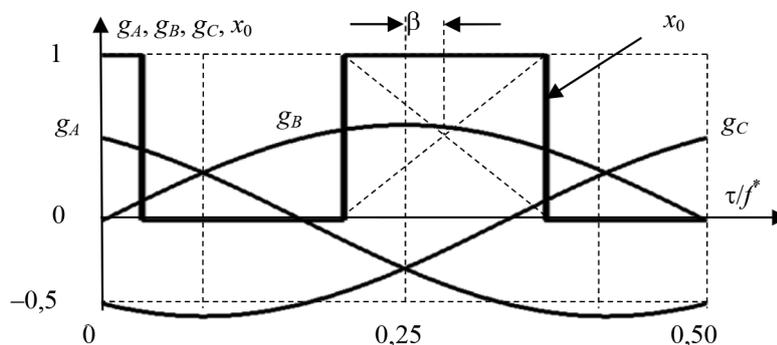


Рис. 3. График булевой переменной x_0 , определяющей чередование включенного состояния верхних и нижних ключей

Используя функцию $x_0(\beta)$, запишем функцию предмодуляции, определяющую режим Н-ШИМ:

$$g_0^D(\beta) = \left(1/2 - x_0(\beta) + x_0(\beta) \cdot g_0^{\min} + (1 - x_0(\beta)) \cdot g_0^{\max} \right). \quad (21)$$

Выбор сдвига β коммутационной функции пассивного полумоста $x_0(\beta)$ определяет вид функции предмодуляции $g_0(\beta)$, алгоритм Н-ШИМ (DPWM) и его качество. В иностранной литературе выделяются методы Н-ШИМ при $\beta = 0$ (DPWM-1), $\beta = 1/12$ (DPWM-2), $\beta = 1/6$ (DPWM-3). Графики модулирующих функций полумостов и нулевой потенциальной функции $\gamma_0 = g_0^D(\beta) - 1/2$ при различных значениях β приведены на рис. 4.

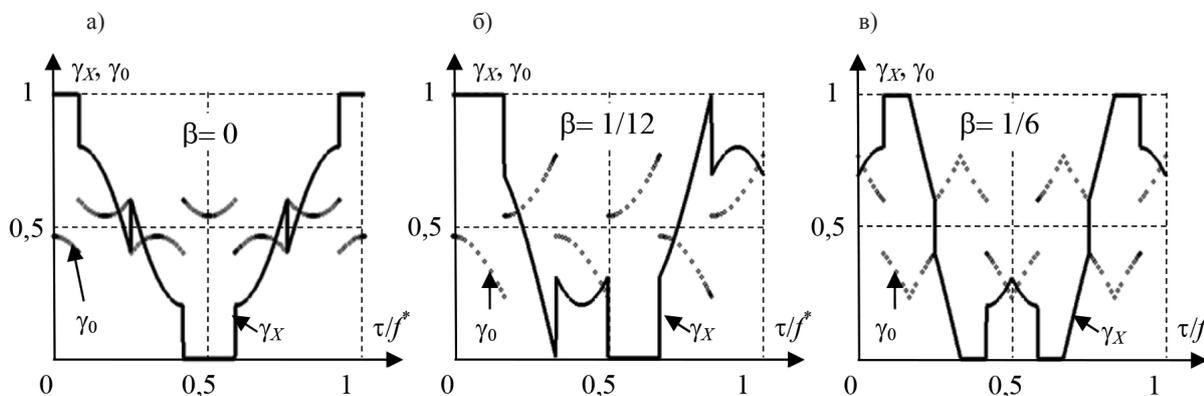


Рис. 4. Графики модулирующих функций полумостов γ_X и нулевой потенциальной функции γ_0 при $a = 0,8$: а — $\beta = 0$; б — $\beta = 1/12$; в — $\beta = 1/6$

Результаты (Results)

Выбор значения β не оказывает влияние на динамические потери в электронных ключах. Однако выбор значения β влияет на качество Н-ШИМ. Так как Н-ШИМ выполняется меньшим числом полумостов, чем П-ШИМ, то очевидно, что качество Н-ШИМ с функцией предмодуляции $g_0(\beta)$, определенной выражением (21), уступает оптимальной П-ШИМ с функцией предмодуляции g_0^0 , определенной выражением (16), которая обеспечивает минимум дисперсии тока в нагрузке. Влияние значений β на качество модуляции будем оценивать по среднеквадратичному отклонению

$$G(\beta) = \frac{6}{f^*} \cdot \int_0^{f^*/6} (g_0^0 - g_0(\beta))^2 \cdot d\tau. \quad (22)$$

Меньшим значениям функции качества Н-ШИМ соответствует лучший алгоритм модуляции. Если положить, что модулирующие функции фазного напряжения определяются выражениями (5), то функция качества Н-ШИМ $G(\beta)$ будет зависеть не только от сдвига β коммутационной функции пассивного полумоста (20), но и от коэффициента амплитуды модуляции a : $G(\beta, a) \cdot 100$. Графики функций $G(\beta, a)$ приведены на рис. 5. Из рис. 5, а следует, что оптимальному алгоритму Н-ШИМ соответствует значение $\beta = 1/6$, и функция предмодуляции $g_0^{D3} = g_0^D(1/6)$. С увеличением коэффициента амплитуды a эффективность Н-ШИМ быстро падает (рис. 5, б).

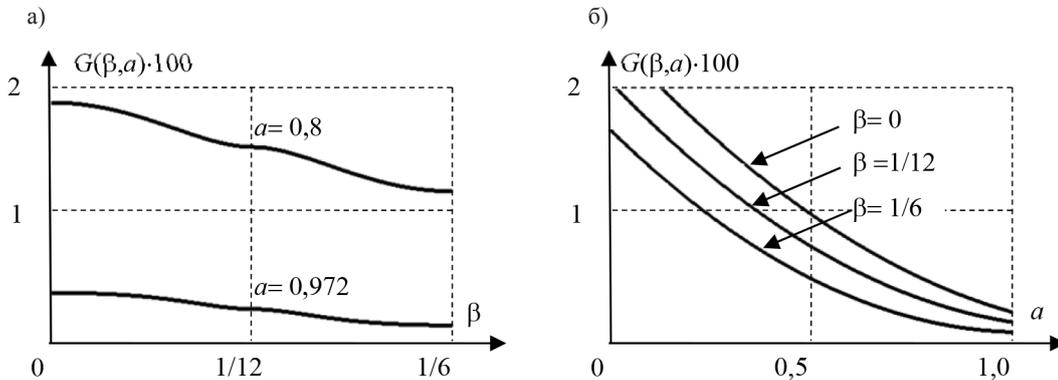


Рис. 5. Графики функции качества Н-ШИМ

Локальная дисперсия межфазного тока при П-ШИМ находится по формуле (9), если положить, что D_{XY} — дисперсия межфазного тока, порождаемая двухфазной модуляцией (13), где $X, Y = A, B, C$. При полнофазной модуляции в выражении дисперсии (9) свободными переменными являются $\Delta\alpha_x$ и g_0 . Минимум локальной дисперсии П-ШИМ достигается при g_0^0 , определенной выражением (16). В случае применения оптимальной динамической П-ШИМ значение коэффициента c в формуле (14) следует принять равным 11/96. Интегральная дисперсия тока (11) оптимальной П-ШИМ находится по формуле

$$ED(a, f^* | g_0^0) \approx \frac{\delta \cdot a^2}{96 \cdot f^{*2}} \cdot \left(1 - 1,7 \cdot a + 0,875 \cdot a^2 + \frac{13 + 0,45 \cdot a^2}{f^{*2}} \right). \quad (23)$$

Локальная дисперсия межфазного тока при Н-ШИМ между полумостами может быть найдена по формуле (9), где $D_{AB} = D_{XY}$ — дисперсия межфазного тока AB , порождаемая двухфазной модуляцией (13); $D_{AC} = D_{XY}$ — дисперсия межфазного тока AC , порождаемая однофазной модуляцией фазы A (12); $D_{BC} = D_{XY}$ — дисперсия межфазного тока BC , порождаемая однофазной модуляцией фазы B (12); $X = A, B, C$. Дисперсия находится на интервале, на котором фаза C в модуляции не участвует. В случае применения динамической Н-ШИМ значение коэффициента c в формуле (14) следует принять равным 11/48.

Интегральная дисперсия тока (11) оптимальной динамической Н-ШИМ может быть найдена по интервалу относительного времени $\tau \in [0; f^{**}/12]$:

$$ED(a, f^{**} | g_0^{D3}) = \frac{12}{f^{**}} \int_0^{f^{**}/12} D(g_X, \Delta g_X, \Delta \alpha_X, g_0^{D3}) \cdot d\tau \approx \frac{\delta \cdot a^2}{24 \cdot f^{**2}} \cdot \left(1 - 1,91 \cdot a + 0,957 \cdot a^2 + \frac{3,95 - 4,1 \cdot a + 0,47 \cdot a^2 + 0,65 \cdot a^3}{f^{**2}} \right), \quad (24)$$

где a — коэффициент амплитуды модуляции; f^{**} — относительная частота модуляции при Н-ШИМ. Иллюстрация модулирующих функций потенциалов полумостов и фазных напряжений на интервале относительно времени $\tau \in [0; f^{**}/6]$ приведена на рис. 6.

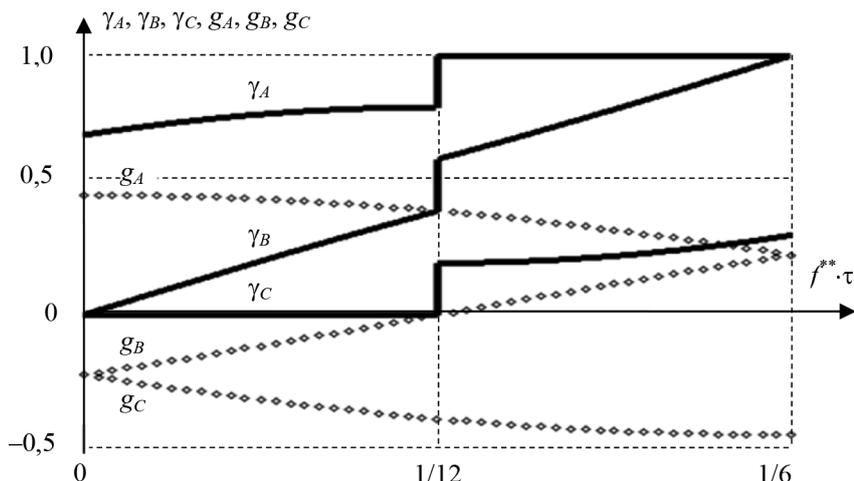


Рис. 6. Иллюстрация модулирующих функций потенциалов полумостов и фазных напряжений

Интегральная дисперсия тока центрально-симметричной Н-ШИМ при $\Delta\alpha_x = 0$ находится по формуле

$$ED_0(a, f^{**} | g_0^{D3}) \approx \frac{\delta \cdot a^2}{24 f^{**2}} \cdot (1 - 1,91 \cdot a + 0,957 \cdot a^2).$$

Эффективность влияния коэффициентов смещения импульсов $\Delta\alpha_x$ на дисперсию тока можно оценить отношением

$$Z_0(a, f^*) = \frac{ED(a, f^{**} | g_0^{D3})}{ED_0(a, f^{**} | g_0^{D3})}.$$

Графики коэффициента эффективности динамической Н-ШИМ относительно центрально-симметричной Н-ШИМ от коэффициента амплитуды модуляции при различной относительной частоте модуляции приведены на рис. 7.

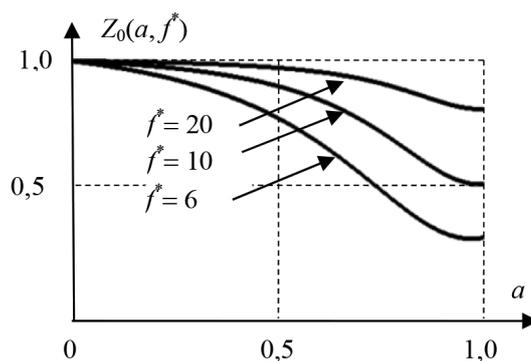


Рис. 7. Графики коэффициента эффективности динамической Н-ШИМ относительно центрально-симметричной Н-ШИМ от коэффициента амплитуды модуляции при различной относительной частоте модуляции

Обсуждение (Discussion)

Отсутствие коммутаций одного из полумостов на периоде напряжения на нагрузке при Н-ШИМ позволяет уменьшить динамические потери в электронных ключах по сравнению с алгоритмом П-ШИМ в $k = \frac{3f^*}{2f^* + 6}$ раз. Следовательно, чтобы обеспечить равные динамические

потери в электронных ключах при П-ШИМ и Н-ШИМ относительная частота модуляции должна определяться выражением $f^{**} = kf^*$.

Алгоритмы П-ШИМ и Н-ШИМ характеризуются каждый своей дисперсией тока нагрузки (23) и (24), которая зависит от коэффициента амплитуды модуляции a и относительной частоты модуляции f^* . Применение алгоритма П-ШИМ или Н-ШИМ зависит от величины отношения дисперсий тока нагрузки (23) и (24):

$$Z(a, f^*) = \frac{ED(a, f^* | g_0^0)}{ED(a, f^{**} | g_0^{D3})},$$

которое далее называется *коэффициентом эффективности ШИМ*. Если $Z(a, f^*) < 1$, то целесообразно применять оптимальную П-ШИМ. В противном случае целесообразно применять оптимальную Н-ШИМ. Зависимости коэффициента эффективности ШИМ от коэффициента амплитуды модуляции при различной относительной частоте модуляции приведены на рис. 8, а.

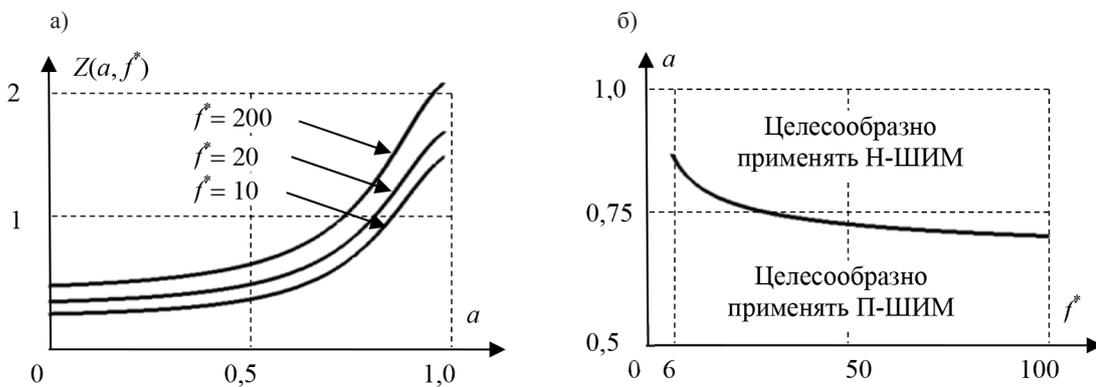


Рис. 8. Графики: а) коэффициента эффективности ШИМ от коэффициента амплитуды модуляции при различной относительной частоте модуляции; б) границы целесообразности применения П-ШИМ и Н-ШИМ

Из данного графика следует что, при небольших значениях коэффициента амплитуды модуляции целесообразно применять П-ШИМ. В области больших значений коэффициента амплитуды модуляции целесообразно применять Н-ШИМ. Граница целесообразности применения П-ШИМ и Н-ШИМ находится из уравнения

$$ED(a, f^* | g_0^0) = ED(a, f^{**} | g_0^{D3}).$$

График границы целесообразности применения П-ШИМ и Н-ШИМ приведен на рис. 8, б. При $f^* \in [6; 100]$ граница целесообразности применения П-ШИМ и Н-ШИМ может быть описана приближенной зависимостью

$$a = a_0 = 0,63 + \frac{1}{2f^{*0,4}}.$$

Комбинационный алгоритм П-ШИМ и Н-ШИМ. Из графиков, приведенных на рис. 8, следует, что существуют области целесообразного применения П-ШИМ и Н-ШИМ по критерию дисперсии тока в нагрузке при одинаковых потерях мощности в электронных ключах. Для описания оптимального алгоритма ШИМ, использующего П-ШИМ и Н-ШИМ, введем булеву функцию

$$z_0 = 1(a_0 - a),$$

принимающую значение 1, если следует применять алгоритм П-ШИМ и 0, если — Н-ШИМ.

Булеву функцию (20) при $\beta = 1/6$ можно записать в более компактном виде:

$$x_0 = 1(g_A) + 1(g_B) + 1(g_C) - 1.$$

Модулирующую функцию потенциалов полумостов запишем в следующем виде:

$$\gamma_X = g_X + s_0 - s_0 \cdot \max\{g_A, g_B, g_C\} - (1 - s_0) \cdot \min\{g_A, g_B, g_C\},$$

где $s_0 = x_0 \cdot (1 - z_0) + z_0 / 2$.

При $z_0 = 1$ значение $s_0 = 1/2$, а модулирующая функция потенциалов полумостов примет вид

$$\gamma_X = \frac{1 - \max\{g_A, g_B, g_C\} - \min\{g_A, g_B, g_C\}}{2} + g_X.$$

Данной модулирующей функции потенциалов полумостов будет соответствовать векторная ШИМ. Заметим, что эффективность динамической векторной ШИМ при $a < a_0$ уступает оптимальной П-ШИМ по величине дисперсии тока не более чем на 1 %. При $z_0 = 0$ значение $s_0 = x_0$, а модулирующая функция потенциалов полумостов будет соответствовать оптимальной динамической Н-ШИМ.

Коэффициенты смещения импульсов при динамической оптимальной ШИМ с фиксированным значением динамических потерь в электронных ключах следует вычислять по формуле

$$\Delta\alpha_X = \frac{11 \cdot (2 - z_0)}{96} \cdot \Delta g_X.$$

Частоту модуляции следует вычислять в соответствии с функцией

$$f_0 = \frac{1}{T_0} \cdot \left(z_0 + \frac{3 \cdot (1 - z_0)}{(2 \cdot T_1 / T_0 + 6)} \right),$$

где T_0 — период модуляции, выбранный так, чтобы иметь заданные потери мощности при номинальной нагрузке на электронные ключи; T_1 — период модулирующего напряжения.

Коммутирующие функции управления полумостами определяются выражением

$$\chi_X = 1 \left(\frac{1 + \gamma_X}{2} + \Delta\alpha_X - \varphi(t) \right) \cdot 1 \left(\varphi(t) - \frac{1 - \gamma_X}{2} - \Delta\alpha_X \right),$$

где $\varphi(t) = f_0 \cdot t - \text{floor}(f_0 \cdot t)$ — пилообразная функция реального времени. Описанный комбинированный алгоритм П-ШИМ и Н-ШИМ позволяет существенно снизить дисперсию тока при низкой частоте модуляции.

Заключение (Conclusion)

Свободными переменными трехфазного моста, по которым можно вести оптимизацию П-ШИМ, являются параметры смещения импульсов относительно центра интервала модуляции и функция предмодуляции. Свободными переменными трехфазного моста, по которым можно вести оптимизацию Н-ШИМ, являются параметры смещения импульсов относительно центра интервала модуляции и параметр смещения булевой функции переключений. Оптимизация по параметрам смещения импульсов эффективна лишь при низкой относительной частоте модуляции. При относительной частоте модуляции $f^* = 10$ и коэффициенте амплитуды модуляции напряжения $a = 1$ оптимизация по параметрам смещения импульсов снижает дисперсию тока Н-ШИМ в 1,76 раза. При относительной частоте модуляции $f^* > 40$ можно использовать центрально-симметричную ШИМ. Эффективность оптимизации Н-ШИМ по параметру смещения булевой функции переключений не превышает 7 %.

Отсутствие коммутаций одного из полумостов при Н-ШИМ позволяет уменьшить динамические потери в электронных ключах по сравнению П-ШИМ, поэтому частоту коммутации при Н-ШИМ можно увеличить до уровня, при котором потери энергии в ключах при П-ШИМ и Н-ШИМ совпадают. При равенстве потерь энергии в ключах сравнение дисперсий оптимальной П-ШИМ и Н-ШИМ по величине интегральной дисперсии тока в нагрузке показывает, что использование Н-ШИМ предпочтительнее П-ШИМ при большой частоте модуляции и коэффициенте ам-

плитуды модуляции $a > 0,69$. Уменьшение относительной частоты модуляции ведет к сужению области нецелесообразного применения Н-ШИМ. При $a = 0,972$ и относительной частоте модуляции $f^* = 40$ интегральная дисперсия оптимальной Н-ШИМ меньше дисперсии оптимальной П-ШИМ в 1,87 раза, а при $f^* = 10$ — в 1,51 раза.

Применение комбинированного оптимального управления преобразователем с использованием П-ШИМ и Н-ШИМ ведет к существенному снижению дисперсии токов при низких частотах модуляции. Следствием снижения дисперсии токов является снижение потерь энергии от модуляции и виброшумовых характеристик в гребных электроприводах большой мощности.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Schonung A.* Static frequency changers with subharmonic control in conjunction with reversible variable speed a.c. drives / A. Schonung, H. Stemmler // *Brown Boveri Review*. — 1964. — Vol. 51. — No. 8/9. — Pp. 555–577.

2. *Виноградов А. Б.* Векторное управление электроприводами переменного тока / А. Б. Виноградов. — Иваново: Изд-во Ивановского гос. энергетического ун-та им. В. И. Ленина, 2008. — 298 с.

3. *Hava A. M.* High-Performance Generalized Discontinuous PWM Algorithm / A. M. Hava, R. J. Kerkman, T. A. Lipo // *IEEE Transactions on Industry Applications*. — 1998. — Vol. 34. — Is. 5. — Pp. 1059–1071. DOI: 10.1109/28.720446.

4. *Holmes D.G.* Pulse width modulation for power converters: Principles and Practice / D. G. Holmes, T. A. Lipo. — New-York: Wiley-IEEE Press, 2003. — 734 p.

5. *Buja G.* Improvement of pulse width modulation techniques / G. Buja, G. Indri // *Electrical Engineering (Archiv fur Elektrotechnik)*. — 1975. — Vol. 57. — Is. 5. — Pp. 281–289. DOI: 10.1007/BF01476709.

6. *Houldsworth J. A.* The use of harmonic distortion to increase the output voltage of a three-phase PWM inverter / J. A. Houldsworth, D. A. Grant // *IEEE Transactions on Industry Applications*. — 1984. — Vol. IA-20. — Is. 5. — Pp. 1224–1228. DOI: 10.1109/TIA.1984.4504587.

7. *Bowes S. R.* Suboptimal switching strategies for microprocessor-controlled PWM inverter drives / S. R. Bowes, A. Midoun // *IEE Proceedings B (Electric Power Applications)*. — IET Digital Library, 1985. — Vol. 132. — Is. 3. — Pp. 133–148. DOI: 10.1049/ip-b.1985.0019.

8. *Van der Broeck H. W.* Analysis and realization of a pulse width modulator based on voltage space vectors / H.W. van der Broeck, H.-C. Skudelny, and G.V. Stanke // *IEEE Transactions on Industry Applications*. — IEEE, 1988. — Vol. 24. — Is. 1. — Pp. 142–150. DOI: 10.1109/28.87265.

9. *Обухов С. Г.* Широтно-импульсная модуляция в трехфазных инверторах напряжения / С. Г. Обухов, Е. Е. Чаплыгин, Д. Е. Кондратьев // *Электричество*. — 2008. — № 7. — С. 23а–31.

10. *Çetin N. O.* Scalar PWM implementation methods for three-phase three-wire inverters / N. O. Çetin, A. M. Hava // *Electrical and Electronics Engineering, 2009. ELECO 2009. International Conference on. IEEE, 2009*. — Pp. I-447-I-451. DOI: 10.1109/ELECO.2009.5355253.

11. *Garces L. J.* Current control of field oriented AC induction motor drives / L. J. Garces // *IEEE Tutorial: Microprocessor Control of Motor Drives and Power Converters*. — Canada, Toronto, 1993. — Pp. 5–46.

12. *Hava A. M.* A Generalized Scalar PWM Approach with Easy Implementation Features for Three-Phase, Three-Wire Voltage-Source Inverters / A. M. Hava, N. O. Çetin // *IEEE Transactions on Power Electronics*. — 2011. — Vol. 26. — Is. 5. — Pp. 1385–1395. DOI: 10.1109/TPEL.2010.2081689.

13. *Хухтиков С. В.* Исследование и разработка инверторов напряжения с ШИМ с пассивной фазой: автореф. дис. ... канд. техн. наук / С. В. Хухтиков. — М., 2013. — 20 с.

14. *Баховцев И. А.* Анализ и синтез энергооптимальных способов управления инверторами с ШИМ: автореф. дис. ... д-ра техн. наук; специальность: 05.08.12 — Силовая электроника / И. А. Баховцев. — Новосибирск, 2017. — 36 с.

15. *Белоусов И. В.* Оптимальная трехфазная широтно-импульсная модуляция по критерию дисперсии тока в нагрузке / И. В. Белоусов, В. Ф. Самосейко // *Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова*. — 2018. — Т. 10. — № 3. — С. 575–585. DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-3-575-585.

16. А. с. 471646 СССР, МПК H02P 13/24. Способ управления трехфазным преобразователем частоты / Г. С. Зиновьев, В. И. Попов, Е. И. Уланов; опубл. 25.05.1975; бюл. № 19.

17. А. с. 515245 СССР, МПК H02P 13/18. Способ управления тиристорами автономного трехфазного мостового инвертора напряжения / М.А. Житков, В.А. Добрускин; опубл. 25.05.1976; бюл. № 19.
18. А. с. 748793 СССР, МПК H02P 13/18. Способ управления трехфазным мостовым инвертором / В. А. Добрускин, А. Ю. Рождественский, М. А. Житков; опубл. 15.07.1980; бюл. № 26.
19. Schorner J. Bezugsspannung zur umrichtersteuerung/J. Schorner//ETZ-b.—1975.— Bd. 27. — Pp. 151–152.
20. Ojo O. The generalized discontinuous PWM scheme for three-phase voltage source inverters / O. Ojo // IEEE Transactions on Industrial Electronics. — 2004. — Vol. 51. — No. 6. — Pp. 1280–1289.
21. Nayeemuddin M. Space Vector Based High Performance Discontinuous Pulse Width Modulation Algorithms for VSI Fed AC Drive /M. Nayeemuddin, C. S. Rao//International Journal of Science and Research (IJSR). — 2016. — Vol. 5. — Is. 7. — Pp.203–208.
22. Tao X.Global synchronous discontinuous pulse width modulation method with fast calculation capability for distributed three-phase inverters / X.Tao, W. Ran, Z. Ke, G. Feng // Journal of Modern Power Systems and Clean Energy. — 2016. — Vol. 4. — Is. 1. — Pp. 103–112. DOI: 10.1007/s40565-015-0180-5.
23. Trzynadlowski A. M. Space vector PWM technique with minimum switching losses and a variable pulse rate / A.M.Trzynadlowski, R.L.Kirlin, S.F.Legowski // IEEE Transactions on Industrial Electronics. — 1997. — Vol. 44. — Is. 2. — Pp. 173–181. DOI: 10.1109/41.564155.

REFERENCES

1. Schonung, A., and H. Stemmler. “Static frequency changers with subharmonic control in conjunction with reversible variable speed a.c. drives.” *Brown Boveri Review* 51.8/9 (1964): 555–577.
2. Vinogradov, A.B. *Vektornoe upravlenie elektroprivodami peremennogo toka*. Ivanovo: GOUVPO «Ivanovskii gosudarstvennyi energeticheskii universitet imeni V.I. Lenina», 2008.
3. Hava, Ahmet M., Russel J. Kerkman, and Thomas A. Lipo. “A high-performance generalized discontinuous PWM algorithm.” *IEEE Transactions on Industry applications* 34.5 (1998): 1059–1071. DOI: 10.1109/28.720446.
4. Holmes, D. Grahame, and Thomas A. Lipo. *Pulse width modulation for power converters: principles and practice*. John Wiley & Sons, 2003.
5. Buja, G., and G. Indri. “Improvement of pulse width modulation techniques.” *Electrical Engineering (Archiv fur Elektrotechnik)* 57.5 (1975): 281–289. DOI: 10.1007/BF01476709.
6. Houldsworth, John A., and Duncan A. Grant. “The use of harmonic distortion to increase the output voltage of a three-phase PWM inverter.” *IEEE Transactions on Industry Applications* IA-20.5 (1984): 1224–1228. DOI: 10.1109/TIA.1984.4504587.
7. Bowes, S. R., and A. Midoun. “Suboptimal switching strategies for microprocessor-controlled PWM inverter drives.” *IEE Proceedings B (Electric Power Applications)*. Vol. 132. No. 3. IET Digital Library, 1985. 133–148. DOI: 10.1049/ip-b.1985.0019.
8. Van der Broeck, H. W., H.-C. Skudelny, and G.V. Stanke. “Analysis and realization of a pulse width modulator based on voltage space vectors.” *IEEE Transactions on Industry Applications*. Vol. 24. Is. 1. IEEE, 1988. 142–150. DOI: 10.1109/28.87265.
9. Obukhov, S. G., E. E. Chaplygin, and D.E. Kondrat’ev. “Shirotno-impul’snaya modulyatsiya v trekhfaznykh inverterakh napryazheniya.” *Elektrichestvo* 7 (2008): 23a–31.
10. Cetin, N. Onur, and Ahmet M. Hava. “Scalar PWM implementation methods for three-phase three-wire inverters.” *Electrical and Electronics Engineering, 2009. ELECO 2009. International Conference on*. IEEE, 2009.
11. Garces, L. J. “Current control of field oriented AC induction motor drives.” *IEEE Tutorial: Microprocessor Control of Motor Drives and Power Converters*. Canada, Toronto, 1993. 5–46.
12. Hava, Ahmet M., and N. Onur Cetin. “A generalized scalar PWM approach with easy implementation features for three-phase, three-wire voltage-source inverters.” *IEEE Transactions on Power Electronics* 26.5 (2011): 1385–1395. DOI: 10.1109/TPEL.2010.2081689.
13. Khukhtikov, S. V. Issledovanie i razrabotka inverteorov napryazheniya s ShIM s passivnoi fazoi. Abstract of PhD diss. M., 2013.
14. Bakhovtsev, I. A. Analiz i sintez energooptimal’nykh sposobov upravleniya inverteorami s ShIM. Abstract of Dr. diss. Novosibirsk, 2017.

15. Belousov, Igor V., and Veniamin F. Samosejko. "Optimum three-phase pulse width modulation according to the criterion of dispersion of the current to the load." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 10.3 (2018): 575–585. DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-3- 575-585.
16. Zinov'ev, G. S., V. I. Popov, and E. I. Ulanov. Sposob upravleniya trekhfaznym preobra-zovatelem chastity. Patent 471646, IPC N 02 R 13/24. USSR assignee. Publ. 25 May 1975.
17. Zhitkov, M. A., and V. A. Dobruskin. Sposob upravleniya tiristorami avtonomnogo trekhfaznogo mostovogo invertora napryazheniya. Patent 515245, IPC N 02 R 13/18. Publ. 25 May 1976.
18. Dobruskin, V. A., A. Yu. Rozhdestvenskii, and M. A. Zhitkov. Sposob upravleniya trekhfaznym mostovym invertorom. Patent 748793, IPC N 02 R 13/18. Publ. 15 July 1980.
19. Schorner, J. "Bezugsspannung zur umrichtersteuerung." *ETZ-b* 27 (1975): 151–152.
20. Ojo, Olorunfemi. "The generalized discontinuous PWM scheme for three-phase voltage source inverters." *IEEE Transactions on Industrial Electronics* 51.6 (2004): 1280–1289.
21. Nayeemuddin M., and C. Srinivasa Rao. "Space Vector Based High Performance Discontinuous Pulse Width Modulation Algorithms for VSI Fed AC Drive." *International Journal of Science and Research (IJSR)* 5.7 (2016): 203–208.
22. Tao, Xu, Wei Ran, ZhouKe, and GaoFeng. "Global synchronous discontinuous pulse width modulation method with fast calculation capability for distributed three-phase inverters." *Journal of Modern Power Systems and Clean Energy* 4.1 (2016): 103–112. DOI: 10.1007/s40565-015-0180-5.
23. Trzynadlowski, Andrzej M., R. Lynn Kirlin, and Stanislaw F. Legowski. "Space vector PWM technique with minimum switching losses and a variable pulse rate [for VSI]." *IEEE Transactions on Industrial Electronics* 44.2 (1997): 173–181. DOI: 10.1109/41.564155.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Белоусов Игорь Владимирович —
доцент
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала
С.О. Макарова»
198035, Российская Федерация, Санкт-Петербург,
ул. Двинская, 5/7
e-mail: kaf_electroprivod@gumrf.ru, ibel@bk.ru

Самосейко Вениамин Францевич —
доктор технических наук, профессор
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала
С.О. Макарова»
198035, Российская Федерация, Санкт-Петербург,
ул. Двинская, 5/7
e-mail: kaf_electroprivod@gumrf.ru,
samoseyko@mail.ru

Belousov, Igor V. —
Associate professor
Admiral Makarov State University of Maritime
and Inland Shipping
5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg, 198035,
Russian Federation
e-mail: kaf_electroprivod@gumrf.ru, ibel@bk.ru

Samosejko, Veniamin F. —
Dr. of Technical Sciences, professor
Admiral Makarov State University of Maritime
and Inland Shipping
5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg, 198035,
Russian Federation
e-mail: kaf_electroprivod@gumrf.ru,
samoseyko@mail.ru

Статья поступила в редакцию 8 мая 2018 г.
Received: May 8, 2018.

ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И АВТОМАТИЗАЦИЯ НА ТРАНСПОРТЕ

DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-4-857-869

DECISION-MAKING INTELLIGENT SUPPORT AT DISPATCHING GEOSPATIAL PROCESSES OF MARINE TRANSPORT

Y. A. Ivakin, S. N. Potapychev

St. Petersburg Institute for Informatics and Automation of the Russian Academy of Sciences,
St. Petersburg, Russian Federation

State-of-the-art means for decision-making intelligent support at dispatching the geospatial processes of the sea transport that implement digital cartographic data sets do not allow an operational and adequate enough account of the natural environment changing properties affecting the dispatching decisions made at a control of complexly distributed totalities of geospatial processes. At that the dispatching is the final manifestation of a multidimensional control process of geospatial processes on the sea surface. Conventionally, a control problem of the sea transport objects' that realize geospatial processes is being solved in isolation from the accounting for a current state of the marine environment and for the variability of its hydrological, hydrophysical and other characteristics. As a rule, only issues of changing the hydrographic and hydrometeorological conditions are subjected to consideration as they concern the maritime safety and navigation specifics. Now the more complex version of the spatial processes dispatching problem is of great interest, when the environment variability defines the unique dispatching conditions in each point of the coordinated geographic space. Such problem's statement is especially actual under the circumstances of implementing the up-to-date adaptive monitoring and natural environment probing means, like subsystems for surveillance of the matching spatial sea processes dispatching systems. The above statement novelty as well as an approach to this version of the problem solving is in a fusion of data pertinent to the spatial processes representation area and data matching the typical models of digital data sets, integration of software mechanisms used to arrange for a proper work with information about geospatial processes and programs of dealing with cartographic data sets. Development of a reasonable formulation and method for solving the given version of a problem forms the essence of this paper.

Keywords: Geospatial data, multilevel information processing, intelligent geoinformation system, dispatching of spatial processes.

For citation:

Ivakin, Yan A., and Sergei N. Potapychev. "Decision-making intelligent support at dispatching geospatial processes of marine transport." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova* 10.4 (2018): 857–869. DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-4-857-869.

УДК 681.1.003

ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНАЯ ПОДДЕРЖКА ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ ПРИ ДИСПЕТЧЕРИЗАЦИИ ГЕОПРОСТРАНСТВЕННЫХ ПРОЦЕССОВ МОРСКОГО ТРАНСПОРТА

Я. А. Ивакин, С. Н. Потапычев

Санкт-Петербургский институт информатики и автоматизации
Российской академии наук (СПИИРАН), Санкт-Петербург, Российская Федерация

Современные средства интеллектуальной поддержки принятия решений при диспетчеризации геопроцессов морского транспорта с применением цифровых картографических наборов данных не в должной мере позволяют оперативно и с достаточной степенью адекватности

учитывать изменяющиеся свойства природной среды, оказывающие влияние на диспетчерские решения, принимаемые при управлении сложно распределенными совокупностями геопространственных процессов. При этом диспетчеризация есть итоговое проявление многогранного процесса управления геопространственными процессами на морской поверхности. Традиционно задача управления объектами морского транспорта, реализующими геопространственные процессы, решается в отрыве от учета текущего состояния морской среды, без учета изменчивости ее гидрологических, гидрофизических и других характеристик. Учету подлежат исключительно вопросы изменения гидрографических и гидрометеорологических условий в части вопросов, касающихся безопасности мореплавания и специфики навигации. Значительный интерес в современных условиях представляет более сложный вариант задачи диспетчеризации пространственных процессов, когда изменчивость среды определяет уникальные условия для диспетчеризации в каждой точке координированного географического пространства. Особенно такая постановка задачи актуальна в условиях внедрения современных адаптивных средств мониторинга и зондирования природной среды как подсистем наблюдения соответствующих систем диспетчеризации пространственных процессов на море. Новизна такой постановки и метода решения этого варианта задачи заключается в слиянии данных предметной области представления пространственных процессов с данными, соответствующими типовым моделям цифровых наборов данных, интеграции программных механизмов работы с информацией о геопространственных процессах и программ работы с картографическими наборами данных. Разработка обоснованной постановки и метода решения указанного варианта задачи составляет суть данной статьи.

Ключевые слова: геопространственные данные, многоуровневая обработка информации, интеллектуальная геоинформационная система, диспетчеризация пространственных процессов.

Для цитирования:

Ивакин Я. А. Интеллектуальная поддержка принятия решений при диспетчеризации геопространственных процессов морского транспорта / Я. А. Ивакин, С. Н. Потапычев // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2018. — Т. 10. — № 4. — С. 857–869. DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-4-857-869.

Введение (Introduction)

В статье раскрывается метод решения задачи интеллектуальной поддержки принятия решений с использованием цифровых картографических наборов данных при управлении (диспетчеризации) процессами движения динамических объектов в географическом пространстве. Под термином «диспетчеризация пространственных процессов в географическом пространстве» понимается постоянное и непрерывное воздействие на контролируемые пространственные процессы с целью обеспечения безопасного характера их взаимного протекания. При этом «пространственный процесс» — это процесс, развивающийся в географическом пространстве с течением времени (движение судна, полет самолета и др.).

В основу разрабатываемого метода положен подход к организации интеллектуальной поддержки принятия решений на основе интеграции методов искусственного интеллекта и ГИС-технологий обработки цифровых картографических наборов данных. Реализация этого метода предполагается как последовательность решения следующих частных задач:

1) конкретизация концептуальной модели применения цифровых картографических наборов данных для интеллектуальной поддержки принятия решений при диспетчеризации геопространственных процессов;

2) уточнение системы требований, логической структуры и программной архитектуры систем интеллектуальной поддержки принятия решений при диспетчеризации геопространственных процессов с использованием данных из цифровых картографических наборов;

3) определение онтологической модели предметной области диспетчеризации геопространственных процессов как модели представления геопространственных процессов с применением цифровых картографических наборов данных;

4) реализация комплекса методик поддержки диспетчеризации пространственных процессов.

Содержательное раскрытие сути преобразований, выполняемых на каждом из этапов метода при решении каждой частной задачи, позволяет раскрыть метод в целом.

Методы и материалы (Methods and Materials)

Этапы применения картографических наборов данных при интеллектуальной поддержке принятия диспетчерских решений. В основе интеллектуальной поддержки принятия решений при диспетчеризации геопространственных процессов с применением цифровых картографических наборов данных лежит совокупность моделей и методов слияния данных предметной области представления пространственных процессов с данными, соответствующими типовым моделям цифровых наборов, интеграции программных механизмов работы с информацией о геопространственных процессах и программе работы с картографическими наборами данных.

Моделирование геопространственных процессов и интеллектуальная поддержка решений по их диспетчеризации осуществляются с использованием технологий работы со сложноструктурированными пространственными данными на базе онтологий предметных областей. При этом основой для выработки рекомендаций на диспетчерские воздействия является сценарий штатного протекания пространственного процесса. Именно степень отклонения того или иного геопространственного процесса от штатного сценария его протекания определяет необходимость и объем диспетчерского воздействия. Целью такого воздействия является снижение указанного отклонения до приемлемого. Предлагаемые в рамках метода отдельные средства направлены на разработку рациональных последовательностей действий по формулированию и оценке параметров таких диспетчерских воздействий.

Задача оптимальной диспетчеризации совокупности пространственных процессов с учетом уравнения изменения фазовых координат имеет вид [1]

$$x(t_i) = f[x(t_{i-1}), u(t_i), t_i], t_i \in [0, T], i = 1, \dots, N \quad (1)$$

при диспетчерских воздействиях $u(t_i)$, обеспечивающих выбор корректирующих воздействий S_{it} , функциональной структуры (функций или режимов работы) R_{it} , а также связанных с оптимизацией внутренней совокупности пространственных процессов Y_{it} :

$$u(t_i) = \{S_{it}, R_{it}, Y_{it}\}, S_{it} \in \mathbb{C}_S, R_{it} \in \mathbb{C}_R, Y_{it} \in \mathbb{C}_Y, i = 0, \dots, N, \quad (2)$$

в общем виде формулируется как задача пошагового выбора допустимого управления $u(t_1), u(t_2), \dots, u(t_i), \dots, u(t_N)$, которое обеспечивает значение показателя эффективности $P(u)$ системы не менее заданного порогового P_3 :

$$P(u) \geq P_3, \quad (3)$$

или экстремального значения:

$$P(u) \rightarrow \max \text{ или } P(u) \rightarrow \min. \quad (4)$$

Процесс выработки управляющего воздействия является заключительным элементом многоуровневой модели поддержки принятия диспетчерских решений [2] в распределенной системе диспетчеризации, обеспечивая воздействие на соответствующие элементы управляемых геопространственных процессов (рис. 1).

Опираясь на концептуальные решения, представленные в работе [2], можно произвести функциональную декомпозицию процесса пошаговой диспетчеризации геопространственных процессов:

$$\begin{aligned} &u_1(t_1), u_1(t_2), \dots, u_1(t_N); \\ &u_j(t_1), u_j(t_2), \dots, u_j(t_N); \\ &u_k(t_1), u_k(t_2), \dots, u_k(t_N), \end{aligned} \quad (5)$$

где $j = 1, \dots, K$ — количество диспетчеризируемых геопространственных процессов.

Каждый диспетчеризируемый геопространственный процесс характеризуется своим объектом управления, множеством управляющих воздействий, а также своими критериями и показателями эффективности.

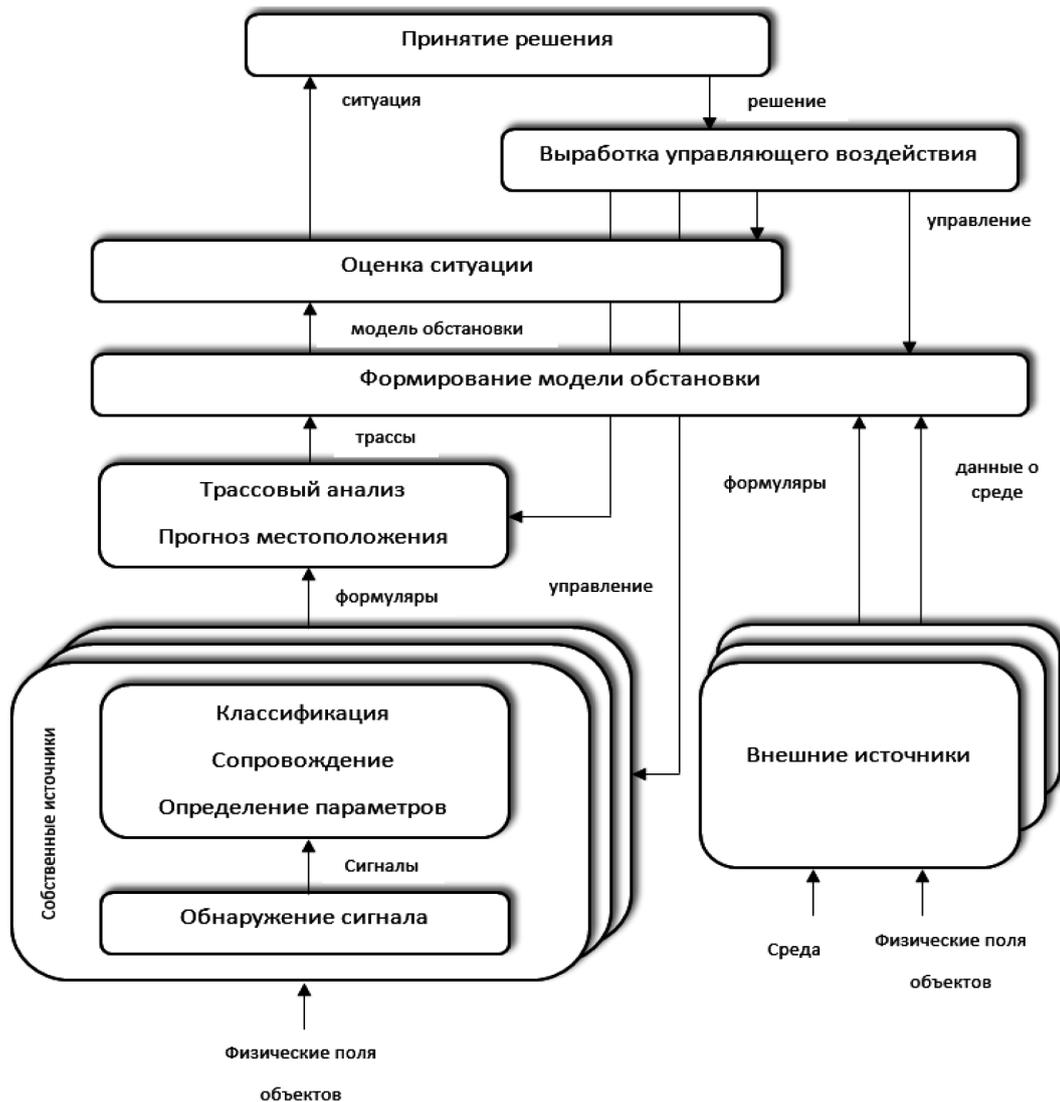


Рис. 1. Обобщенная модель поддержки принятия диспетчерских решений

Основные результаты (Main Results)

Специфика применения цифровых картографических данных при диспетчеризации пространственных процессов. Представляется рациональным рассмотреть данный вопрос применительно к следующим составляющим процесса поддержки принятия диспетчерских решений.

Применение цифровых картографических наборов данных при управлении распределенными источниками информации о протекании геопространственных процессов.

В условиях изменчивости среды потенциал обнаружения распределенных источников информации о протекании геопространственных процессов зависит от географических координат расположения этих источников и определяется для каждого источника так называемым *объемом зоны наблюдения*, в пределах которой вероятность обнаружения диспетчеризируемого объекта, реализующего геопространственный процесс, является величиной не менее заданного значения. Поисковые усилия источника информации в таком варианте будут вычисляться согласно следующего соотношения:

$$\Phi_i = \iiint_{V_i} F(x, y, z) dx dy dz = \int_{Z_{\min}}^{Z_{\max}} dz \iint_S F(x, y) dx dy, \quad (6)$$

где $F(x, y, z)$ — потенциал обнаружения в точке, принадлежащей объемной фигуре, характеризующей зону наблюдения; $F(x, y)$ — потенциал обнаружения на плоскости (на горизонтальном

срезе) объемной фигуры; Z_{\min} — min значение глубины (высоты) возможного нахождения объекта диспетчеризации; Z_{\max} — max значение глубины (высоты) возможного нахождения объекта диспетчеризации; S — площадь горизонтального среза зоны наблюдения.

Для варианта зоны гарантированного обнаружения объекта диспетчеризации, т. е. когда

$$F(x, y, z) = F(x, y) = 1, \quad (7)$$

усилия соответствующего источника информации следует рассчитывать согласно соотношению

$$\Phi_i = \int_{Z_{\min}}^{Z_{\max}} S(z) dz, \quad (8)$$

где $S(z)$ — площадь горизонтального среза зоны наблюдения на горизонте z .

Задача оптимального управления источниками информации в рамках всей распределенной системы диспетчеризации пространственных процессов заключается в таком размещении их в географическом пространстве, которое позволяет удовлетворить следующий критерий:

$$P_{\text{обн}} = 1 - \exp \left[- \left[\frac{\sum_{i=1}^N \Phi_i}{V_0} \right] \rightarrow \max \right], \quad (9)$$

где $P_{\text{обн}}$ — вероятность обнаружения объекта, реализующего геопространственный процесс; V_0 — объем географического пространства, в рамках которого действует или на которое распространяется компетенция системы диспетчеризации пространственных процессов (район диспетчеризации); N — количество источников информации.

Очевидно, что

$$V_0 = \int_{Z_{\min}}^{Z_{\max}} S_0(z) dz, \quad (10)$$

где $S_0(z)$ — площадь горизонтального среза объемной фигуры, характеризующей географическое пространство, в рамках которого действует или на которое распространяется компетенция системы диспетчеризации пространственных процессов.

При равномерном законе распределения объекта, реализующего геопространственный процесс, в пределах района диспетчеризации $w(x, y, z) = \text{const}$ критерий предполагает определение такой комбинации геопространственных данных (x_i, y_i, z_i) , характеризующих положение источников информации, которое позволяет добиться максимума суммарных усилий наблюдения $\sum_{i=1}^N \Phi_i$ распределенной системы диспетчеризации при следующих ограничениях:

– на равномерность покрытия v усилиями всего объема района диспетчеризации V_0 :

$$v_1 = v_2 = \dots = v_i = \dots = v_N; \quad (11)$$

$$v_i = \frac{\Phi_i}{V_{0i}} = \text{const}, \quad (12)$$

где V_{0i} — подобъем района диспетчеризации, выделенного для обследования i -го источника информации о диспетчеризируемых пространственных процессах.

– на отсутствие перекрытий областей V_{0i} источников информации при $\sum_{i=1}^N \Phi_i \leq V_0$ или одина-

ковый объем перекрытий для всех соседних источников информации при $\sum_{i=1}^N \Phi_i > V_0$.

При неравномерном законе распределения объекта, реализующего геопространственный процесс, в пределах района диспетчеризации: при $w(x, y, z) \neq \text{const}$, решение задачи предполагает определение такой комбинации геопространственных данных (x_i, y_i, z_i) , характеризующих положение каждого источника информации, которое позволяет добиться выполнения в каждой точке района диспетчеризации следующего условия:

$$\exp[-F(x, y, z)]\omega(x, y, z) = \lambda = \text{const}, \quad (13)$$

где $F(x, y, z)$ — потенциал по наблюдению, суммарно реализуемый источниками информации распределенной системы диспетчеризации; значение λ определяет области геопространства, в которых наиболее рационально сосредоточить источники информации, т. е. реализаторы функций наблюдения.

Решение задачи заключается в следующем: повышая концентрацию источников информации, а именно реализаторов функций наблюдения, из состава системы диспетчеризации пространственных процессов в подрайоне наибольшей плотности вероятности нахождения объекта-реализатора пространственного процесса, становится возможным оценить объем усилий указанной системы диспетчеризации на управление распределенными источниками информации о протекании геопространственных процессов:

$$\Phi_0 = \sum_{i=1}^N \iiint_{V_i} F(x, y, z) dx dy dz. \quad (14)$$

Далее, задав величину λ и соответствующий объем геопространства, в котором сосредотачиваются усилия V_{ii} на базе соотношения

$$\Phi(\lambda) = \iiint_{V_{ii}} \{\ln[\omega(x, y, z)]\} dx dy dz - V_{ii} \ln(\lambda) \quad (15)$$

рассчитывается требуемый объем управляющих воздействий на распределенные источники информации о протекании геопространственных процессов, отвечающих условию

$$\Phi(\lambda) = \Phi_0, \quad (16)$$

и закрепляется та часть района, в которой сосредотачиваются усилия системы диспетчеризации V_{ii} .

После определения части района, в которой сосредотачиваются усилия системы диспетчеризации V_{ii} , необходимо установить точные места размещения источников информации в пределах, ограниченных значением λ , на основе соотношения

$$\Phi_i = \int_{z_{i-1}}^{z_i} dz \int_{y_{i-1}}^{y_i} dy \int_{x_{i-1}}^{x_i} \{\ln[\omega(x, y, z)]\} dx - (x_i - x_{i-1})(y_i - y_{i-1})(z_i - z_{i-1}) \ln(\lambda). \quad (17)$$

Если при заданных V и λ взаимным расположением источников информации добиться выполнения условия

$$\Phi_1 = \sum_{i=1}^N \Phi_i \geq \Phi_0 \quad (18)$$

не получается, то их следует пересчитать для варианта $\Phi_0 = \Phi_1$ и т. д.

Вероятность успешности управления распределенными источниками информации о протекании геопространственных процессов со стороны пространственно-распределенной системы диспетчеризации, построенной по представленной ранее методике, рассматривается как

$$P_{\text{обн}} = \iiint_{V_{ii}} \{\omega(x, y, z)\} dz dy dx - \bar{V}_{ii} \lambda. \quad (19)$$

Режимы работы составных частей системы диспетчеризации R_i в ходе оптимизации принимаются с учетом обеспечения каждой составной частью максимальных значений диспетчерских воздействий на управляемые источники информации о протекании геопространственных процессов, определяемые в виде

$$R_i : \Phi_i = \iiint_{V_i} F(x, y, z) dz dy dx \rightarrow \max, R_i \subset \Omega. \quad (20)$$

Использование геопространственных данных в процессе анализа траекторий и прогнозирования расположений объектов, реализующих пространственные процессы.

Эффективность анализа траекторий и прогнозирования расположений объектов, реализующих пространственные процессы, представляется вероятностью перепутывания траекторий P_{ii} . Как показано в источнике [2], снижение вероятности перепутывания траекторий определяется

процессом уменьшения погрешности локализации расположений объектов, реализующих пространственные процессы. Это достигается отбором отметок от разнесенных источников информации по нескольким координатам, а также использованием дополняющих признаков объектов, реализующих пространственные процессы.

Современные способы обработки указанных данных позволяют создать стробы сопровождения не только в горизонтальной, но и в вертикальной плоскости. Для этого в соответствующих составных частях системы диспетчеризации реализуются соответствующие методы, позволяющие добиться локализации положения объектов, реализующих пространственные процессы в вертикальной плоскости. Обязательным условием воплощения таких методов стробирования и обработки первичной информации является применение геопространственных данных, поддерживающих определение передаточной функции среды распространения зондирующих сигналов. Также геопространственные данные применяются для идентификации объектов, реализующих пространственные процессы и выявленных разными источниками информации из состава системы диспетчеризации (в частности, для определения гипотезы о характере перемещения ведомого несколькими источниками информации объекта, реализующего пространственный процесс). В этом случае рациональным инструментарием обработки пространственных данных выступает экспертная система, которая реализует следующий прикладной функционал:

– выявление признаков, характерных для маневров специфических объектов, реализующих пространственные процессы;

– придание дополнительных возможностей по интерпретации цифровых пространственных данных о характеристиках объектов, реализующих геопространственные процессы, поступающие от взаимодействующих информационных и управляющих систем;

– учёт при выдвижении гипотез о траекториях движения объектов, реализующих пространственные процессы некоторых геопространственных данных по району диспетчеризации соответствующей системы.

Применение геопространственных данных в качестве базовой основы модели обстановки.

Информационная модель обстановки создается по данным составных частей и источников системы диспетчеризации пространственных процессов. Она представляет собой множество условных знаков геопространственных объектов, нанесенных на электронную карту и отображающих существование объектов реального мира, наличие инфраструктуры и природной среды в рамках заданного геопространственного района [2]. Информационная модель обстановки есть базовая основа, на основе анализа которой производится определение класса складывающейся в процессе функционирования системы диспетчеризации пространственной ситуации. Также на её основе выполняется прогноз развития пространственной ситуации и вырабатываются диспетчерские воздействия, обеспечивающие решение заданного круга задач диспетчеризации в объективно формирующейся обстановке.

В информационной модели обстановки традиционно выделяют два аспекта: статический и динамический. *Статический аспект* представляет собой совокупность графических объектов и их свойств, а также других данных обстановки, которые неизменны во времени, т. е. неизменны в пределах временных рамок (цикла) принятия управленческих решений в системе диспетчеризации геопространственных процессов. Для формирования статического аспекта информационной модели обстановки используются геопространственные данные, сконцентрированные в определенных специализированных базах данных. *Динамический аспект* есть совокупность графических объектов и их свойств, а также других данных, характеризующих обстановку, которые могут изменяться в пределах временных рамок (цикла) принятия управленческих решений в системе диспетчеризации геопространственных процессов. Для формирования динамического аспекта обстановки применяются системно обновляемые геопространственные данные. Такие цифровые данные могут быть использованы как при поступлении от источников информации, так и после предварительной обработки экспертной системой, с помощью использования специальных логико-математических методов. Разработанные методы пространственного мо-

делирования позволяют формировать на основе геопространственных данных как двухмерные, так и трехмерные модели обстановки [2].

Критерий результативности формирования информационной модели обстановки есть достижение максимального значения ее достоверности P_d применительно к реальной обстановке, наблюдаемой в районе диспетчеризации. Соответственно достоверность характеризуется полнотой p_s , точностью p_σ и своевременностью p_t представляемых диспетчеру графических объектов, отражающих геопространственную обстановку, т. е.

$$P_d = f(p_s, p_\sigma, p_t) \rightarrow \max. \quad (21)$$

Трехмерные информационные модели обстановки нагляднее чем двухмерные, но нуждаются при формировании в дополнительных данных, предполагают создание базы трехмерных изображений, предъявляют более высокие требования к аппаратным средствам, реализующим этот вид моделей.

Применение геопространственных данных для оценки ситуации и выработки диспетчерских воздействий.

Применение пространственных данных значительно увеличивает возможности синтеза параметров, определяющих пространственную ситуацию, подлежащую диспетчеризации. Для оценки таких параметров используют специализированные программные аналитические модели. В итоге применение геопространственных данных для оценки ситуации и выработки диспетчерских воздействий позволяет принять диспетчерское решение о классе пространственной ситуации и необходимости применения диспетчерских воздействий на контролируемые пространственные процессы. Критерием эффективности оценки ситуации и выработки диспетчерских воздействий является достижение максимального значения вероятности правильного отнесения такой ситуации к соответствующему классу ситуаций $p_{п.кл.}$, а также достижение минимального времени определения класса ситуации $T_{кл.}$.

Резюмирующим этапом функционирования системы диспетчеризации пространственных процессов является именно реализация управляющих воздействий на объекты, реализующие геопространственные процессы. Описание конкретизированных программных технологий, предназначенных для реализации приведенных выше подходов по работе с геопространственными данными при диспетчеризации пространственных процессов, приведено в работе [3].

Обобщенная архитектура программной реализации системы работы с картографическими наборами цифровых данных при интеллектуальной поддержке диспетчерских решений показана на рис. 2.

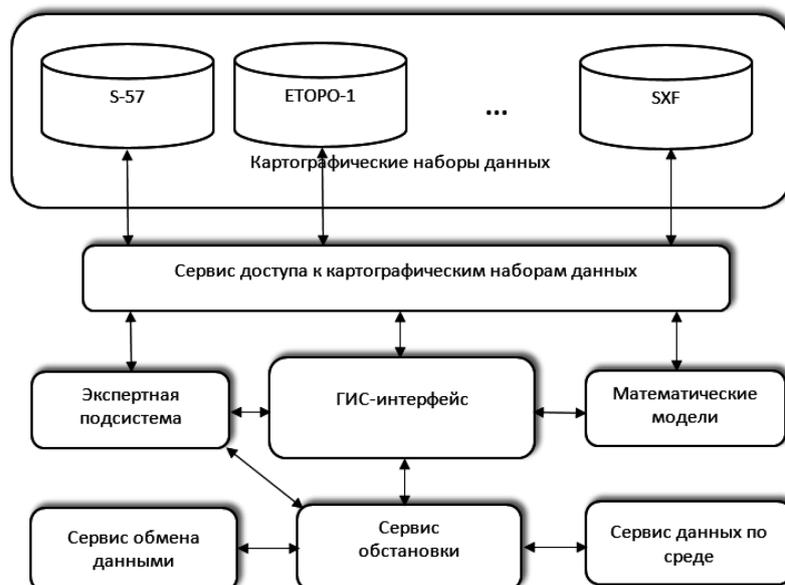


Рис. 2. Архитектура программной системы для работы с картографическими наборами данных при диспетчеризации пространственных процессов

Интеллектуализация моделирования геопространственных процессов. Моделирование геопространственных процессов, осуществляемое в системах диспетчеризации, можно рассмотреть как некоторое гомоморфное преобразование, так как любой гомоморфизм порождает модель, т. е. каждая модель определяется некоторым гомоморфизмом, причем выбор соответствующего гомоморфизма зависит от того, какие свойства исходного процесса считаются существенными при моделировании [4]. При таком подходе основным принципом системного моделирования является *принцип многомодельности*, реализация которого применительно к задаче выявления нештатных ситуаций в процессе протекания нескольких геопространственных процессов выражается в построении и использовании на практике иерархической системы моделей экспертных знаний. Так, можно принять, что на множестве моделей экспертных знаний существует модель $M = \{M_i, i = \overline{1, n}\}$ бинарного отношения $r_M = M, R_M, R_M \subseteq M \times M$. Указанное отношение далее именуется *отношением моделирования*, определяемым на основе введения понятия *уровня моделирования*: модель $M_i (i = \overline{1, n})$ является моделью экспертных знаний i -го уровня моделирования (формализации) и моделью $(i - j)$ -го уровня по отношению к модели $M_j (j = \overline{1, i})$ [5]. Например, модель M_3 является моделью экспертных знаний 3-го уровня и моделью 2-го уровня по отношению к M_1 .

Таким образом, тот факт, что некоторая упорядоченная пара моделей $M_i, M_j (i, j = \overline{1, n}, i \geq j)$ связана отношением моделирования (что записывается как $M_i r_M M_j$ экспертные знания M или как $M_i, M_j \in R_M$) содержательно означает, что модель экспертных знаний M_i есть модель (метамодель) $i - j$ -го уровня по отношению к модели (объектной модели) M_j . Естественно предположить наличие у введенного отношения моделирования следующих свойств:

– *рефлексивности*:

$$\forall (i = \overline{1, n}) M_i r_M M_i, \quad (22)$$

т. е. каждая из моделей экспертных знаний есть «модель (0-го уровня моделирования) самой себя»;

– *антисимметричности*:

$$\forall (i, j = \overline{1, n}, i \neq j) M_i r_M M_j \Rightarrow \neg (M_j r_M M_i), \quad (23)$$

т. е. имеет место «направленность» отношения моделирования в сторону возрастания степени формализации модельных представлений (модель более низкого уровня формализации не может быть моделью по отношению к модели более высокого уровня);

– *транзитивности*:

$$\forall (i, j, k = \overline{1, n}) M_i r_M M_j \wedge M_j r_M M_k \Rightarrow (M_i r_M M_k), \quad (24)$$

т. е. при наличии «промежуточной» модели результирующий уровень моделирования определяется как сумма связанных с ней уровней формализации $i - k = (i - j) + (j - k)$, при этом модель i -го уровня выступает одновременно в двух ролях — как метамодель по отношению к M_k и как объектная модель по отношению к модели M_j ;

– *полноты*:

$$\forall (i, j = \overline{1, n}) M_i r_M M_j \vee M_j r_M M_i, \quad (25)$$

т. е. имеется возможность сравнения по отношению r_M моделей экспертных знаний M .

Свойства (22) – (24) определяют наличие на множестве M частичного (нестроого) порядка, а свойство (25) превращает данный порядок в строгий (линейный). Количество звеньев в цепочке моделей должно определяться, с одной стороны, спецификой моделируемых геопространственных процессов и характером решаемых задач по их диспетчеризации, а с другой — особенностями работы эксперта и инженера по знаниям в процессе многоэтапной многоуровневой формализации экспертных знаний. К системе моделей экспертных знаний при этом предъявляются следующие требования [5], [6]:

– переходы между уровнями моделирования не должны вызывать затруднений у эксперта и инженера по знаниям в процессе их совместной деятельности по созданию базы знаний интеллектуальной подсистемы поддержки решений диспетчера;

– при переходе от модели экспертных знаний одного (более высокого) к модели другого (более низкого) уровня формализации недопустимы потеря и (или) искажение информации.

Учитывая указанные требования, а также исходя из особенностей предметной области диспетчеризации пространственных процессов, можно предложить ряд уровней моделирования (формализации) экспертных знаний, которые могут быть условно названы: содержательным, структурно-содержательным, структурно-формальным, формальным и программным [7].

Особенности представления экспертных знаний на каждом из уровней моделирования сводятся к следующему [8] – [16]:

1. Содержательная (концептуальная) модель экспертных знаний, являясь их «первичной» моделью, соответствует вербальному (словесному) описанию экспертом множества понятий, выделяемых в предметной области диспетчеризации пространственных процессов, и их взаимосвязей (онтологии предметной области). К ним также должны быть отнесены различного рода положения правоустанавливающих документов, руководств, наставлений, инструкций и т. п., принимаемые для описания стандарта пространственной ситуации.

Построение структурно-содержательной модели экспертных знаний связано со структурированием выделенной совокупности понятий предметной области — формированием структуры понятийной системы в явном виде.

Структурно-формальная модель экспертных знаний содержит две компоненты: структурную и формальную. Первая из них тождественна соответствующей компоненте структурно-содержательной модели, а вторая, формальная компонента, является результатом формализации содержательной составляющей структурно-содержательной модели средствами некоторого формального языка.

Формальная модель экспертных знаний, в отличие от структурно-формальной модели, характеризуется отсутствием структурной компоненты и наличием формально-языковых конструкций, с помощью которых осуществляется формализация экспертных знаний.

Программная модель экспертных знаний образуется в результате представления формальной модели с помощью соответствующих программных и инструментальных средств представления экспертных знаний.

Комплекс разработанных моделей составляет базу знаний экспертной системы для интеллектуальной поддержки решений по диспетчеризации пространственных процессов, которая, в свою очередь, является средством формирования отдельных эталонных пространственных ситуаций и сценариев корректного развития диспетчеризируемых пространственных процессов.

Заключение (Conclusion)

Эффективность диспетчеризации пространственных процессов в соответствующем географическом районе Мирового океана определяется качеством обработки информации на отдельных этапах функционирования многоуровневой системы поддержки диспетчерских решений по управлению объектами морского транспорта. Существующие направления развития интеллектуальных средств поддержки принятия решений, комплексов работы с цифровыми картографическими данными различной тематической направленности, моделей окружающей географической среды дают возможность применения геопространственных данных на всех уровнях диспетчеризации и управления объектами, реализующими пространственные процессы. В свою очередь, этот факт дает основу для повышения степени достоверности соответствующих информационных моделей обстановки и принятия более обоснованных диспетчерских решений. Однако работа с гео-

пространственной информацией требует не только применения сложных логико-математических и программно- расчетных моделей, но и оригинального подхода к интеллектуализации моделирования обработки соответствующей информации. Реализация указанных моделей и подходов, интеллектуализация поддержки принятия диспетчерских решений в ближайшем будущем обеспечат принципиально новый уровень автоматизации функционирования систем диспетчеризации геопространственных процессов на морском транспорте.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (проект №18-07-00437), а также Государственной работы «Проведение фундаментальных научных исследований по программам РАН № 0073-2018-0003».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Мирошник И. В.* Нелинейное и адаптивное управление сложными динамическими системами / И. В. Мирошник, В. О. Никифоров, А. Л. Фрадков. — СПб.: Наука, 2000. — 549 с.
2. *Ermolaev V.* Modeling of Search Actions Under the Conditions of Variable Environment Properties / V. Ermolaev // Information Fusion and Geographic Information Systems (IF AND GIS 2013). — Springer, Berlin, Heidelberg, 2014. — Pp. 107–117. DOI: 10.1007/978-3-642-31833-7_7.
3. Интеллектуальные географические информационные системы для мониторинга морской обстановки / Под общ. ред. чл.-кор. РАН Р. М. Юсупова и д-ра техн. наук В. В. Поповича. — СПб.: Наука, 2013. — 284 с.
4. *Крон Г.* Исследование сложных систем по частям — диакоптика / Г. Крон. — М.: Наука, 1972. — 544 с.
5. *Де Марко Т.* Вальсируя с медведями. Управление рисками в проектах по разработке программного обеспечения / Т. Де Марко, Т. Листер. — М.: Изд. дом ДН, 2005. — 196 с.
6. *Де Марко Т.* Deadline. Роман об управлении проектами / Т. Де Марко. — М.: Изд-во «Манн-Иванов-Фербер», 2016. — 352с.
7. *Дюваль П. М.* Непрерывная интеграция. Улучшение качества программного обеспечения и снижение риска / П. М. Дюваль, С. Матиас, Э. Гловер. — СПб.: Символ, 2016. — 240 с.
8. *Ермолаев В. И.* Геоинформационная поддержка управления морской распределенной системой наблюдения / В. И. Ермолаев, С. Н. Потапычев, Я. А. Ивакин // Вестник Санкт-Петербургского государственного университета технологий и дизайна. Серия 1. Естественные и технические науки. — 2016. — № 3. — С. 3–9.
9. *Ивакин Я. А.* Применение ГИС-инструментария геохронологического трекинга для сетевого анализа биографических данных / Я. А. Ивакин, О. В. Смирнова, С. Н. Потапычев // Информация и космос. — 2017. — № 1. — С. 132–138.
10. *Мичурин С. В.* Результативность и качество программных комплексов ситуационного управления для автоматизированных систем диспетчеризации пространственных процессов авиатранспорта / С. В. Мичурин, Я. А. Ивакин // Информационно-управляющие системы. — 2016. — Т. 83. — № 4. — С. 19–25. DOI: 10.15217/issn1684-8853.2016.4.19.
11. *Ивакин Я. А.* Обеспечение эффективности геоинформационных систем управления пространственными процессами / Я. А. Ивакин, А. М. Муся // Вопросы радиоэлектроники. Серия: Системы и средства отображения информации и управления спецтехникой. — 2015. — № 1. — С. 151–159.
12. *Кочура А. Е.* Сингулярные матричные пучки в обобщенной симметричной проблеме собственных значений / А. Е. Кочура, Л. В. Подколызина, Я. А. Ивакин, И. И. Нидзиев // Труды СПИИРАН. — 2013. — № (26). — С. 253–276.
13. *Ермолаев В. И.* Применение интеллектуальных геоинформационных систем при проектировании гидроакустических средств / В. И. Ермолаев // Региональная информатика и информационная безопасность: сб. тр. Санкт-Петербургского общества информатики, вычислительной техники, систем связи и управления. — 2016. — С. 446–450.
14. *Popovich V.* 3D+t Acoustic Fields Modeling Based on Intelligent GIS / V. Popovich, Yu. Leontev, V. Ermolaev, D. Chirov, O. Smirnova // Coordinates. — 2015. — Vol. XI. — Is. 02. — Pp. 18–21.

15. Цветков М. В. Использование интеллектуальной географической информационной системы для выявления опасных ситуаций, связанных с безопасностью судоходства по северному морскому пути / М. В. Цветков, Д. О. Малышева // Информационные технологии в управлении (ИТУ-2016): материалы 9-й конф. по проблемам управления. — СПб.: Концерн «Центральный научно-исследовательский институт «Электроприбор»». — С. 465–475.

16. Ивакин Я. А. Методы интеллектуализации промышленных геоинформационных систем на основе онтологий: дисс. д-ра техн. наук / Я. А. Ивакин. — СПб.: СПбГЭТУ, 2009. — 356 с.

REFERENCES

1. Miroshnik, I. V., V. O. Nikiforov, and A. L. Fradkov. *Nelineinoe i adaptivnoe upravlenie slozhnymi dinamicheskimi sistemami*. SPb.: Izd-vo Nauka, 2000.

2. Ermolaev, Victor. “Modeling of Search Actions Under the Conditions of Variable Environment Properties.” *Information Fusion and Geographic Information Systems (IF AND GIS 2013)*. Springer, Berlin, Heidelberg, 2014. 107–117. DOI: 10.1007/978-3-642-31833-7_7.

3. Yusupov, R. M., and V. V. Popovich, eds. *Intellektual'nye geograficheskie informatsionnye sistemy dlya monitoringa morskoi obstanovki*. SPb: Nauka, 2013.

4. Kron, G. *Issledovanie slozhnykh sistem po chastyam – diakoptika*. M.: Nauka, 1972.

5. DeMarko, T., and T. Lister. *Val'siruya s medvedyami. Upravlenie riskami v proektakh po razrabotke programmogo obespecheniya*. M.: Izdatel'skii dom DH, 2005.

6. DeMarko, T. *Deadline. Roman ob upravlenii proektami*. M.: Izdatel'stvo «Mann-Ivanov-Ferber», 2016.

7. Dyugal', P. M., S. Matias, and E. Glover. *Nepreryvnaya integratsiya. Uluchshenie kachestva programmogo obespecheniya i snizhenie riska*. SPb.: Simvol, 2016.

8. Ermolaev, V. I., S. N. Potapychev, and J. A. Ivakin. “Geoinformation support of maritime surveillance distribution system.” *Vestnik of St. Petersburg State University of Technology and Design. Series I. Natural and technical science* 3 (2016): 3–9.

9. Ivakin, Ya. A., O. V. Smirnova, and S. N. Potapychev. “Primenenie GIS-instrumentariya geokhronologicheskogo trekinga dlya setevogo analiza biograficheskikh dannykh.” *Informatsiya i kosmos* 1 (2017): 132–138.

10. Michurin, S. V., and Ya. A. Ivakin. “The Effectiveness and Quality of Situational Management Software for Automated Dispatching of Air Transport Spatial Processes.” *Information and Control Systems* 83.4 (2016): 19–25. DOI: 10.15217/issn1684-8853.2016.4.19.

11. Ivakin, Ya. A., and A. M. Musya. “Obespechenie effektivnosti geoinformatsionnykh sistem upravleniya pro-stranstvennymi protsessami.” *Voprosy radioelektroniki. Seriya: Sistemy i sredstva otobrazheniya informatsii i upravleniya spetstekhniki* 1 (2015): 151–159.

12. Kochura, Alexander Eugenyevich, Ludmila Victorovna Podkolzina, Yan Albertovich Ivakin, and Ivan Ivanovich Nidziev. “Singular matrix bundles in a generalized symmetric problem of eigenvalues.” *SPIIRAS Proceedings* 3(26) (2013): 253–276.

13. Ermolaev, V. I. “Primenenie intellektual'nykh geoinformatsionnykh sistem pri proektirovanii gidroakusticheskikh sredstv.” *Regional'naya informatika i informatsionnaya bezopasnost' Sbornik trudov. Sankt-Peterburgskoe obshchestvo informatiki, vychislitel'noi tekhniki, sistem svyazi i upravleniya*. 2016. 446–450.

14. Popovich, Vasily, Yuri Leontev, Victor Ermolaev, Dmitry Chirov, and Oksana Smirnova. “3D+ Acoustic Fields Modeling Based on Intelligent GIS.” *Coordinates* XI.02 (2015): 18–21.

15. Tsvetkov, M. V., and D. O. Malysheva. “Ispol'zovanie intellektual'noi geograficheskoi informatsionnoi sistemy dlya vyyavleniya opasnykh situatsii, svyazannykh s bezopasnost'yu sudokhodstva po severnomu morskому puti.” *Informatsionnye tekhnologii v upravlenii (ITU-2016): Materialy 9-i konferentsii po problemam upravleniya*. SPb.: Kontsern “Tsentral'nyi nauchno-issledovatel'skii institut “Elektroprigor”. 465–475.

16. Ivakin, Ya. A. *Metody intellektualizatsii promyshlennykh geoinformatsionnykh sistem na osnove ontologii*. Dr. diss. SPb.: Sankt-Peterburgskii gosudarstvennyi elektrotekhnicheskii universitet «LETI», 2009.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Ивакин Ян Альбертович —

доктор технических наук, профессор,
ведущий научный сотрудник
Санкт-Петербургский институт информатики
и автоматизации Российской академии наук
(СПИИРАН)
199178, Российская Федерация, г. Санкт-Петербург,
14 линия В. О., д. 39
e-mail: ivakin@oogis.ru

Потапычев Сергей Николаевич — кандидат
технических наук, старший научный сотрудник
Санкт-Петербургский институт информатики
и автоматизации Российской академии наук
(СПИИРАН)

199178, Российская Федерация, г. Санкт-Петербург,
14 линия В. О., д. 39
e-mail: potapychev@oogis.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Ivakin, Yan A. —

Dr. of Technical Sciences, professor,
leading researcher
St. Petersburg Institute
for Informatics and Automation
of the Russian Academy of Sciences
39 14th liniya V.O., St. Petersburg, 199178,
Russian Federation
e-mail: ivakin@oogis.ru

Potapychev, Sergei N. —

PhD, senior researcher
St. Petersburg Institute
for Informatics and Automation
of the Russian Academy of Sciences
39 14th liniya V.O., St. Petersburg, 199178,
Russian Federation
e-mail: potapychev@oogis.ru

Статья поступила в редакцию 19 июня 2018 г.

Received: June 19, 2018.

CREATION OF AUTOMATED TELECOMMUNICATION TRAFFIC ROUTING SYSTEM ON INLAND WATERWAYS

A. V. Vasin, V. V. Karetnikov, A. I. Menshikov

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

The article describes the possibility of implementing and operating an automated telecommunication traffic routing system in the conditions of the Volga-Baltic basin. The need to use modern navigation technologies was pointed out at a conference of the presidium of the State Council in Volgograd on August 15, 2016. To solve this problem, the article analyzes the current state of the Volga-Baltic basin and discusses the advantages of creating an automated telecommunication traffic routing system of the Volga-Baltic basin. The implementing of this system, allowing acquisition and processing permanent data (local peculiarities of navigation, rules) and dynamic data (hydrometeorological conditions, current fleet disposition, emergency factors), will provide a number of advantages: reducing the influence of the human factor, increasing capacity through the rationalization of the use of hydraulic engineering structures. The advantages of the economic component of the implementing of the aforementioned system are also disclosed. Problem areas are identified and their brief characteristics are given. As a result, the advantages of using this system are revealed, allowing in a convenient form to predict possible situations associated with the movement of vessels along the main route of the basin, in addition prerequisites are formed that allow making decisions to optimize and ensure the safety of passage of vessels along the most difficult sections of the main route. The use of the innovative system proposed in the article as a software-control technology will allow to effectively solve the tasks of analysis, monitoring and regulation of the transport process, which will have a favorable effect on reducing idle time, reducing economic losses, increasing capacity and improving the safety of navigation in the Volga-Baltic Basin waterways of the Russian Federation.

Keywords: Volga-Baltic basin, bridges, traffic routing system, navigational hydraulic structures, safety of navigation, inland water transport.

For citation:

Vasin, Andrey V., Vladimir V. Karetnikov, and Aleksandr I. Menshikov. "Creation of automated telecommunication traffic routing system on inland waterways." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 10.4 (2018): 870–879. DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-4-870-879.

УДК 528.088

К ВОПРОСУ СОЗДАНИЯ ТЕЛЕКОММУНИКАЦИОННОЙ АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ ОРГАНИЗАЦИИ ДВИЖЕНИЯ НА ВНУТРЕННИХ ВОДНЫХ ПУТЯХ

А. В. Васин, В. В. Каретников, А. И. Меншиков

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

В статье рассматривается возможность применения и работы телекоммуникационной автоматизированной системы организации движения судов в условиях Волго-Балтийского бассейна. Необходимость применения современных навигационных технологий была отмечена на заседании президиума Государственного Совета в Волгограде 15 августа 2016 года. Для решения поставленной задачи в статье анализируется текущее состояние Волго-Балтийского бассейна и рассматриваются преимущества создания телекоммуникационной автоматизированной системы организации движения судов в этом бассейне. Внедрение данной системы, позволяющей выполнять сбор и обработку постоянных (местные особенности судоходства, правила) и динамических данных (гидрометеосостояние, текущая диспозиция флота, аварийные факторы), предоставит следующие преимущества: уменьшение влияния человеческого фактора и уве-

личение пропускной способности за счет рационализации использования гидротехнических систем. Также раскрываются преимущества экономической составляющей внедрения вышеупомянутой системы. Определяются проблемные участки и дается их краткая характеристика. Вследствие этого раскрываются преимущества использования данной системы, позволяющей в удобной форме прогнозировать возможные ситуации, связанные с движением судов по основной трассе бассейна и, кроме того, формируются предпосылки, позволяющие принимать решения по оптимизации и обеспечению безопасности прохода судов по наиболее сложным участкам основной трассы. Использование предложенной в статье инновационной системы в качестве программно-управляющей технологии позволит эффективно решать задачи анализа, мониторинга и регулирования транспортного процесса, что благоприятным образом отразится на сокращении времени простоя судов, снижении экономических потерь, увеличении пропускной способности и повышении уровня безопасности судоходства на акватории Волго-Балтийского бассейна внутренних водных путей Российской Федерации.

Ключевые слова: Волго-Балтийский бассейн, мосты, система организации движения, судоходные гидротехнические сооружения, безопасность судоходства, внутренний водный транспорт.

Для цитирования:

Васин А. В. К вопросу создания телекоммуникационной автоматизированной системы организации движения на внутренних водных путях / А. В. Васин, В. В. Каретников, А. И. Меншиков // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2018. — Т. 10. — № 4. — С. 870–879. DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-4-870-879.

Введение (Introduction)

15 августа 2016 г. в Волгограде, на выездном заседании президиума Государственного Совета по вопросу «О развитии внутренних водных путей Российской Федерации», Президент РФ В. В. Путин отметил чрезвычайную важность развития внутренних водных путей (ВВП). Были определены главные направления развития ВВП:

1. Устранение инфраструктурных ограничений.
2. Рационализация перевозок, результатом которой явится снижение затрат перевозчика и отправителя, а также бюджетных расходов.
3. Обновление речного флота.

Кроме того, была особо отмечена необходимость применения инновационных навигационных технологий и средств, что должно благоприятно отразиться на увеличении эффективности использования ВВП и повысить безопасность судоходства за счет снижения влияния человеческого фактора [1].

На сегодняшний день развитие внутреннего водного транспорта (ВВТ) является одной из основных целей транспортной стратегии РФ. На данный момент выполняется реализация второго этапа стратегии (2016 – 2030 гг.), который, в свою очередь, разбит на пятилетние отрезки государственной политики в области развития технологий и информационного обеспечения развития транспортной инфраструктуры [2].

Волго-Балтийский водный путь является одной из главных магистралей ВВП. Основная трасса Волго-Балтийского бассейна (ВББ) проходит через р. Нева, Ладожское озеро, р. Свирь, Онежское озеро, р. Вытегра, р. Ковжа. Также следует отметить, что одной из главных целей подпрограммы «Внутренний водный транспорт» в программе развития транспортной системы Санкт-Петербурга и Ленинградской области на период до 2020 г. является развитие инфраструктуры ВВП, повышение безопасности и надежности работы системы ВВТ и ВВП в Санкт-Петербурге и Ленинградской области [3].

Согласно прогнозу стратегии развития транспортно-логистического комплекса Санкт-Петербурга, ожидается прирост объемов грузоперевозок. По мнению экспертов, их объем на Волго-Балтийском водном пути к 2030 г. должен увеличиться до 26 млн т. Также прогнозируется повышение объема пассажирских перевозок водным транспортом Санкт-Петербурга к 2030 г. до 2,8 млн человек [4].

Целью работы является рассмотрение возможности применения и работы телекоммуникационной автоматизированной системы организации движения в условиях ВББ.

Задачи работы:

- проанализировать текущее состояние и перспективы развития грузоперевозок на ВББ;
- определить лимитирующие участки ВББ;
- уменьшить влияние человеческого фактора и повысить уровень безопасности;
- минимизировать время простоя судов.

В перспективе результаты могут быть использованы ФБУ «Волго-Балт» при организации судопропуска, а именно: при планировании судопропуска, при разработке графиков и расписаний судопропуска.

Методы и материалы (Methods and Materials)

Из анализа грузопотока ВББ [5] можно сделать вывод о стабильном росте объемов перевозок, осуществляемых речными судами и судами «река–море» плавания. Также отмечается тенденция возрастания количества шлюзований, которые в навигацию 2017 г. составили 33,923 ед., а кроме того, имеет место их увеличение на 7,0 % по сравнению с 2016 г. Гидрологические условия в навигацию 2017 г. были достаточно благоприятные. Кроме того, была зафиксирована сравнительно высокая интенсивность пассажирских перевозок [6], осуществляемых в ВББ.

Отсюда следует вывод о том, что увеличение объемов перевозок свидетельствует о росте интенсивности движения судов ВВТ на акватории ВББ. С ростом интенсивности судоходства увеличивается загруженность каналов, шлюзов, рейдов и мест якорной стоянки судов и, следовательно, повышается риск возникновения опасных ситуаций, что, несомненно, оказывает влияние на безопасность судоходства в целом. Согласно статистике по судопропуску за 2017 г. [5], самые загруженные шлюзы ВВП России располагаются на р. Свирь. Таким образом, имеет место необходимость оптимизации движения судов в сочетании с судопропусками через судоходные гидротехнические сооружения (ГТС) на акватории ВББ, что, по всей видимости, позволит снизить влияние человеческого фактора и сократить время простоя судов [7]. Такую задачу необходимо решать с учетом характеристик, местных условий плавания, гидрометеорологической обстановки, а также правил плавания по ВВП [8].

Неблагоприятные погодные условия, гидродинамические факторы, сложность прохода судоходных пролётов мостов и судоходных гидротехнических сооружений приводят к осложнению при проводке судов ВВТ, вынуждая их ожидать необходимых условий или стоять на рейдах, что ведет к простоям флота и снижению провозной способности [9].

Следует отметить, что проблема увеличения пропускной способности судоходных шлюзов, являющаяся одной из наиболее актуальных, связана не только с улучшением их эксплуатационных качеств, но и с растущей интенсивностью движения флота на ВВП РФ. В связи с этим можно выделить четыре основных направления мероприятий по повышению пропускной способности судоходных ГТС [10], однако предложенная система будет направлена на решение двух из них, а именно:

1. Совершенствование организации, методов и средств управления движением судов по шлюзованным водным путям.
2. Ускорение пропуска судов через судоходные ГТС.

Наличие факторов, снижающих пропускную способность, не только препятствует развитию транзитного потенциала, но и ведет к значительным экономическим потерям. Исходя из анализа вышеуказанных причин и предпосылок, кажется целесообразным, чтобы предложенная система автоматически формировала очередность прохождения судами ВББ.

Основываясь на данных источника [11], движение судов с регулированием графика и последовательного снижения скорости хода для самой массовой серии судов, проходящих ВББ танкеров типа «Волгонефть» грузоподъемностью 5 тыс. т позволит сэкономить до 168 млн руб. в течение навигации (по данным 2012 г.). В связи с изменением цен на дизельное топливо с 28 тыс. руб. (по данным 2012 г.) до 42 тыс. руб. (по данным 2018 г.) экономия затрат будет достигать 252 млн руб.

В случае, если судовладелец считает нецелесообразным ожидание судном прохода согласно расписанию, сформированному телекоммуникационной автоматизированной системой организа-

ции движения судов, он может воспользоваться услугой внеочередного права прохода, средства за которую пойдут на обслуживание каналов, гидротехнических сооружений и вспомогательного флота [12]. Таким образом, для оптимизации движения судов, повышения экономической эффективности, уменьшения времени простоя и обеспечения высокого уровня безопасности судоходства на ВВП РФ необходимо внедрение телекоммуникационной автоматизированной системы организации движения с алгоритмом, учитывающим локальную диспозицию флота [13] – [16].

Результаты (Results)

Для создания алгоритма функционирования системы необходимо учесть следующие факторы: распределение рейдов и разрешенных мест якорной стоянки судов; особенности прохода через мосты; расхождение и обгон; видимость. Эти факторы регламентируются определенными правилами, которые требуют учета системой. Следовательно, функционирование системы должно осуществляться на основе приведенного на рис. 1 списка нормативных документов.



Рис. 1. Нормативные документы

Проведенный начальником отдела диспетчерского регулирования А. В. Армеевым анализ выявил неравномерность подхода флота по статистическим данным [17].

Для реализации равномерного судопотока и прохождения судами ГТС при максимальном сокращении задержек предлагается установить приведенную последовательность принятия решений системой:

1. Получение данных о судне (тип, позывной, ИМО номер, значения длины и ширины судна, скорость и т. д.). Эти данные могут поступать в систему с судового транспондера АИС [18], [19].
2. Прогноз ожидаемого времени прибытия судна, принимая в расчет полученные эксплуатационные характеристики [20].
3. Формирование очереди.

Система должна учитывать обстановку на лимитирующих участках. На таких участках возможны риски и от диспетчеров требуется повышенная бдительность и точность [21].

На участке, приведенном на рис. 2, наиболее трудными для судоходства являются районы судоходных мостов Санкт-Петербурга, Кривое колено, Ивановские пороги, Кошкинский фарватер. Наименьшую высоту на участке Волго-Балтийского водного пути от г. Санкт-Петербурга до Ладожского озера — 36,55 м от проектного уровня и 34,75 м от максимального имеет воздушный переход, расположенный на р. Нева, около пос. Кузьминка (1338 км). На следующем участке к затруднительным для судоходства относятся два судоходных гидротехнических сооружения: Верхне- и Нижнесви́рский шлюзы.

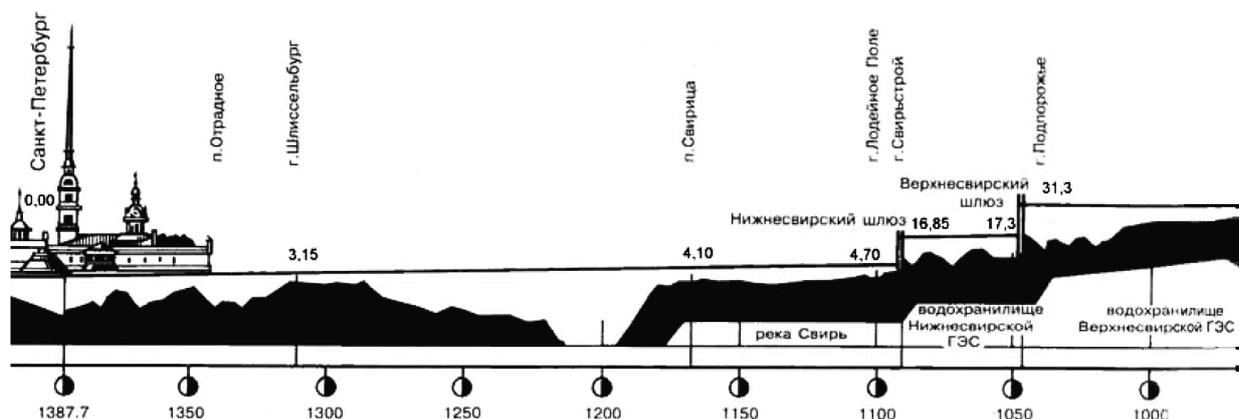


Рис. 2. Схематический продольный профиль Волго-Балтийского водного пути на участке от Санкт-Петербурга до водохранилища Верхнесви́рской ГЭС

Рассмотрим особенности акватории ВББ с точки зрения построения телекоммуникационной автоматизированной системы организации движения, указанные в следующей таблице.

Затруднительные участки движения и их особенности

Название участка	Вид особенности	Ориентиры	Примечания
Кривое колено	Сильное прижимное течение. Запрещены расхождение и обгон судов и составов ¹ , запрещено движение в условиях ограниченной видимости	Участок 1359,8 – 1357,5 км	Течение в районе Новосаратовки направлено к правому берегу, а напротив причала «Невский лесопарк» — к левому
Ивановские пороги	Судам, грузоподъемностью 2000 т и более, трех- и четырехпалубным и пассажирским теплоходам, а также составам запрещено расхождение и обгон. Сильное свальное течение на Ивановскую луду ниже мыса и в Пелловскую заводь выше мыса. Расхождение и обгон судов и составов запрещены ²	Пирогово – Лобаново 1349,0 – 1334,0 км; Кузьминский мост – Холм Славы 1345,0 – 1336,5 км; Холм Славы – Лобаново 1345,0 – 1334,0 км; Пирогово – Лобаново 1349,0 – 1334,0 км	Движение больше габаритных судов и плотовых составов одностороннее

Продолжение табл.

Кошкинский фарватер	Сильные свальные течения на Шереметьевскую отмель	Бугровский приёмный буй – Преображенская гора	Фарватер состоит из шести колен. Кромки судового хода на фарватере приглубы и каменисты, а глубины за кромками малы
Нижнесвицкий	Судам, грузоподъёмностью 2000 т и более, трех- и четырехпалубным и пассажирским теплоходам, а также составам разрешена максимальная скорость 12 км/ч ³ , запрещено движение в условиях ограниченной видимости. Судам грузоподъёмностью 2700 т и более, трех- и четырехпалубным и пассажирским теплоходам, а также составам запрещен обгон ⁴ . Разрешено движение судов со скоростью не более 12 км/ч ⁵	1156,5 – 1103,5 км; 1103,5 – 1085,5 км; 1102,5 – 1100,5 км; 1103,5 – 1087,5 км	
Верхнесвицкий	Расхождение и обгон запрещены ⁶ . Сильные свальные течения. Запрещено движение в условиях ограниченной видимости	⁷ Погра – Подпорожье: 1049,6 – 1043,8 км; 1069,0 – 1039,0 км	

¹Кроме судов длиной 50 м и менее, а также скоростных судов. ²Кроме судов длиной 50 м и менее, а также скоростных судов. ³Кроме судов длиной 50 м и менее, а также скоростных судов. ⁴Кроме судов длиной 50 м и менее, а также скоростных судов. ⁵Кроме судов длиной 50 м и менее, а также скоростных судов. ⁶Кроме судов 30 м и менее и скоростных. ⁷Расхождение и обгон запрещены (кроме судов 30 м и менее и скоростных).

Обсуждение (Discussion)

Из анализа работ [4], [8], [10], [16] видна перспектива на основе инновационного и технологического прорыва, что повлечет увеличение пропускной способности, рационализацию использования шлюзов, а значит, и снижение времени простоя судов. Результатом этого станет коммерческая выгода, что привлечет внимание перевозчиков и инвестиции в эту область.

Данная работа тесно связана с предыдущими исследованиями [19] – [20]. Она представляет собой частный случай использования инфокоммуникационных технологий, а именно создание телекоммуникационной автоматизированной системы организации движения.

Используя результаты исследований [13] – [15], целесообразно применить следующий порядок функционирования системы:

1. Ввод данных о дислокации флота.
2. Регистрация и обработка заявок для занесения в базу данных.
3. Извлечение информации из базы данных для формирования расписания судопропуска.
4. Уточнение расписания судопропуска (в том числе получение данных об изменении расписания и заявки): обработка заявок и данных корректирующих расписание, корректировка заявок или изменение расписания и переход к пп. 3.
5. Оптимизация расписания судопропуска.

Заключение (Conclusion)

К основным причинам создания телекоммуникационной автоматизированной системы организации движения необходимо отнести поставленную правительством задачу внедрения современных технологий, следствием чего станет увеличение пропускной способности. Основ-

ным преимуществом данной системы является уменьшение влияния человеческого фактора, а очевидным результатом — увеличение безопасности судоходства. Рациональное использование шлюзованных систем благоприятным образом скажется на экономической составляющей, а именно прогнозируемая выгода от использования одного только дизельного топлива на танкерах типа «Волгонефть» грузоподъемностью 5 тыс. т составит около 252 млн руб. Назначение ставки за внеочередное право прохода шлюза также приведет к гибкости и клиентоориентированности.

Таким образом, телекоммуникационная автоматизированная система организации движения должна обеспечивать решение следующих задач:

- учёт класса судна, его максимальной скорости, габаритов и характеристик груза;
- формирование электронной очереди с учётом правил пропуска судов и составов через шлюзы ВВП РФ и правил плавания по ним, а также лоций Единой глубоководной системы европейской части РФ;
- организация очередности прохождения контрольных точек судами и информировании об установлении рекомендуемой скорости;
- осуществление динамического изменения очереди в зависимости от изменений текущих метеоусловий и прогноза погоды;
- учёт гидрологических условий плавания;
- выработка рекомендаций по постановке судов на якорь и учёт их распределения на рейдах;
- получение и обмен информацией на основе применения современных технологий.

Сформировать такую систему на ВББ можно на основе эксплуатируемых в настоящее время в отрасли систем местоопределения, мониторинга и связи, а также современных инфо- и телекоммуникационных технологий.

Несомненно, построение такой системы необходимо реализовать на основе имеющихся в распоряжении ФБУ «Администрация «Волго-Балт» технологических решений, что будет рассмотрено в ходе дальнейшей работы по данному направлению.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Заседание президиума Госсовета по вопросу развития внутренних водных путей [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <http://kremlin.ru/events/president/news/52713> (дата обращения: 17.05.2018).
2. Транспортная стратегия Российской Федерации на период до 2030 года: утв. Распоряжением Правительства РФ № 1734-р от 22 ноября 2008 года.
3. *Пантина Т. А.* Концепция и структурная схема формирования стратегии развития внутреннего водного транспорта Российской Федерации на период до 2030 года / Т. А. Пантина // Журнал университета водных коммуникаций. — 2011. — № 3. — С. 166–170.
4. *Поляков К. В.* Стратегия развития транспортной системы Санкт-Петербурга и Ленинградской области до 2030 г. / К. В. Поляков, С. В. Никулина // Транспорт Российской Федерации. — 2016. — № 5 (66). — С. 36–41.
5. Грузоперевозка по Волго-Балту за 2016 год [Электронный ресурс]. — Режим доступа: http://portnews.ru/top_news/230198 (дата обращения: 19.02.2018).
6. Навигация 2017 года по Волго-Балту [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://sdelanounas.ru/blogs/100711> (дата обращения: 21.02.2018).
7. *Erceg B. Č.* Legal Framework of European Inland Waterways and Croatian Legislation on Inland Waterways Navigation—Problems of Non-Harmonized Rules / B. Č. Erceg // European Scientific Journal, ESJ. — 2018. — Vol. 14. — Is. 6. — Pp. 37–57. DOI: 10.19044/esj.2018.c3p4.
8. *Абрамова В. Н.* Состояние и перспективы развития морского и внутреннего водного транспорта России / В. Н. Абрамова, М. В. Ботнарюк // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С.О. Макарова. — 2014. — № 1 (23). — С. 114–120.

9. Мустакаева Е.А. Ключевые проблемы функционирования и развития инфраструктуры внутреннего водного транспорта / Е. А. Мустакаева // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2013. — № 1. — С. 137–145.

10. Хегай Ю. А. Проблемы и перспективы развития транспортной системы в России / Ю.А. Хегай // Теория и практика общественного развития. — 2014. — № 4. — С. 205–207.

11. Кошутин М. А. Некоторые вопросы повышения эффективности организации воднотранспортных перевозок в регионе / М. А. Кошутин // Вестник Белгородского университета кооперации, экономики и права. — 2012. — № 2. — С. 292–296.

12. Поваров Г. В. Методический подход к установлению ставок навигационного сбора за пропуск судов через судопропускные гидротехнические сооружения в условиях зимней навигации / Г. В. Поваров, М. В. Чуркина // Транспортное дело России. — 2014. — № 6. — С. 105–107.

13. Yang Z. Design on Remote Sensing Monitoring System of Navigation Pharos in Bridge Area for Inland Waterway / Z. Yang // Procedia computer science. — 2018. — Vol. 131. — Pp. 409–415. DOI: 10.1016/j.procs.2018.04.223.

14. Chen Z. Classification of vessel motion pattern in inland waterways based on Automatic Identification System / Z. Chen, J. Xue, C. Wu, L. Qin, L. Liu, X. Cheng // Ocean Engineering. — 2018. — Vol. 161. — Pp. 69–76. DOI: 10.1016/j.oceaneng.2018.04.072.

15. 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.

16. Рудых С. В. Исследование судоходной обстановки ГБУ «Волго-Балт» / С. В. Рудых // Журнал университета водных коммуникаций. — 2012. — № 4. — С. 8–14.

17. Николаев В. К. Поиск экономических резервов ГБУ «Волго-Балт» [Электронный ресурс] / В.К. Николаев. — Режим доступа: <http://rus-shipping.ru/ru/stats/?id=40> (дата обращения: 04.04.2018).

18. Emmanuel O. A. Opportunities and challenges of inland waterways transport in the southwest coastal belt of Nigeria / O. A. Emmanuel, P. I. Ifabiyi, A. U. Chijioke // Bhumi, The Planning Research Journal. — 2018. — Vol. 06. — No. 01. — Pp. 10–17. DOI: 10.4038/bhumi.v6i1.34.

19. 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.

20. Сикарев А. А. Современные инфокоммуникационные технологии внутреннего водного транспорта России / А. А. Сикарев, В. В. Каретников // Речной транспорт (XXI век). — 2009. — № 7 (43). — С. 65–68.

21. Пантина Т. А. Некачественные водные пути / Т. А. Пантина // Речной транспорт (XXI век). — 2014. — № 5. — С. 5–9.

REFERENCES

1. Zasedanie prezidiuma Gossoвета po voprosu razvitiya vnutrennikh vodnykh putei. Web. 17 May 2018 <<http://kremlin.ru/events/president/news/52713>>.

2. Transportnaya strategiya Rossiiskoi Federatsii na period do 2030 goda: utv. Rasporyazheniem Pravitel'stva RF № 1734-r ot 22 noyabrya 2008 goda.

3. Pantina, T. A. “Vision and structural pattern of forming the development strategy of inland water transport of the Russian Federation for the period until 2030.” *Zhurnal universiteta vodnykh kommunikatsii* 3 (2011): 166–170.

4. Polyakov, K. V., and S. V. Nikulina. “Strategies for development of transport system of St Petersburg and Leningrad Region through to 2030.” *Transport of Russian Federation* 5(66) (2016): 36–41.

5. Gruzoperevozka po Volgo-Baltu za 2016 god. Web. 19 Feb. 2018 <http://portnews.ru/top_news/230198>.

6. Navigatsiya 2017 goda po Volgo-Baltu. Web. 21 Feb. 2018 <<https://sdelanounas.ru/blogs/100711>>.

7. Erceg, Biljana Činčurak. “Legal Framework of European Inland Waterways and Croatian Legislation on Inland Waterways Navigation—Problems of Non-Harmonized Rules.” *European Scientific Journal, ESJ* 14.6 (2018): 37–57. DOI: 10.19044/esj.2018.c3p4.

8. Abramova, V. N., and M. V. Botnaryuk. "State and prospects of development of sea and inland water transport of Russia." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova* 1(23) (2014): 114–120.
9. Mustakaeva, E. A. "Key problems of functioning and development of inland water transport infrastructure." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova* 1 (2013): 137–145.
10. Khegay, Yury Aleksandrovich. "Problems and prospect of the transport system development in Russia." *Theory and Practice of Social Development* 4 (2014): 205–207.
11. Koshutin, M. A. "Nekotorye voprosy povysheniya effektivnosti organizatsii vodno-transportnykh perevozk v regione." *Vestnik Belgorodskogo universiteta kooperatsii, ekonomiki i prava* 2 (2012): 292–296.
12. Povarov, G., and M. Churkiba. "Methodical approach to establishment of rates of navigation charge for passing courts through shipping hydraulic engineering constructions in the conditions of winter navigation." *Transport business of Russia* 6 (2014): 105–107.
13. Yang, Zhang-li. "Design on Remote Sensing Monitoring System of Navigation Pharos in Bridge Area for Inland Waterway." *Procedia computer science* 131 (2018): 409–415. DOI: 10.1016/j.procs.2018.04.223.
14. Chen, Zhijun, Jie Xue, Chaozhong Wu, LingQiao Qin, Liqun Liu, and Xiaozhao Cheng. "Classification of vessel motion pattern in inland waterways based on Automatic Identification System." *Ocean Engineering* 161 (2018): 69–76. DOI: 10.1016/j.oceaneng.2018.04.072.
15. Stal'makov, V. A. "Use of parallel genetic algorithms for scheduling of ships passing through the gateways systems." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova* 1(20) (2013): 16–25.
16. Rudykh, S. V. "Investigation of navigation conditions of GBU "Volgo-Balt"." *Zhurnal universiteta vodnykh kommunikatsii* 4 (2012): 8–14.
17. Nikolaev, V. K. "Poisk ekonomicheskikh rezervov GBU «Volgo-Balt»." Web. 4 April 2018 <<http://russia-shipping.ru/ru/stats/?id=40>>.
18. Emmanuel, Owoputi Adetose, Paul I. Ifabiyi, and Akpudo U. Chijioko. "Opportunities and challenges of inland waterways transport in the southwest coastal belt of Nigeria." *Bhumi, The Planning Research Journal* 6.1 (2018): 10–17. DOI: 10.4038/bhumi.v6i1.34.
19. Karetnikov, V. V., and V. A. Bekryashev. "Perspektivy kompleksirovaniya rechnykh infokommunikatsionnykh tekhnologii dlya povysheniya bezopasnosti sudokhodstva na vnutrennikh vodnykh putyakh." *Rechnoi transport (XXI vek)* 2(67) (2014): 49–53.
20. Sikarev, A. A., and V. V. Karetnikov. "Sovremennye infokommunikatsionnye tekhnologii vnutrennego vodnogo transporta Rossii." *Rechnoi transport (XXI vek)* 7(43) (2009): 65–68.
21. Pantina, T. A. "Nekachestvennyye vodnye puti." *Rechnoi transport (XXI vek)* 5 (2014): 5–9.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Васин Андрей Васильевич —
доктор технических наук, доцент
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала
С. О. Макарова»
198035, Российская Федерация, Санкт-Петербург,
ул. Двинская, 5/7
e-mail: kaf_pm@gumrf.ru

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

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Vasin, Andrey V. —
Dr. of Technical Sciences, associate professor
Admiral Makarov State University of Maritime
and Inland Shipping
5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg 198035,
Russian Federation
e-mail: kaf_pm@gumrf.ru

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

Меншиков Александр Игоревич — аспирант
Научный руководитель:
Каретников Владимир Владимирович
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала
С. О. Макарова»
198035, Российская Федерация, Санкт-Петербург,
ул. Двинская, 5/7
e-mail: gogashe@yandex.ru

Menshikov, Aleksandr I. — Postgraduate
Supervisor:
Karetnikov, Vladimir V.
Admiral Makarov State University of Maritime
and Inland Shipping
5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg, 198035,
Russian Federation
e-mail: gogashe@yandex.ru

*Статья поступила в редакцию 10 июля 2018 г.
Received: July 10, 2018.*

STRUCTURAL APPROACH TO IMPROVING THE RELIABILITY OF THE SOFTWARE OF INFORMATION SYSTEMS

K. P. Goloskokov¹, M. Yu. Chirkova²

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

² — Saint Petersburg State University of Economics,
St. Petersburg, Russian Federation

The problems discussed in the article are mainly related to the provision of specified performance and reliability indicators of projected software packages for ship information systems through a structural approach to the main stages of the software life cycle. The relevance of this class of software is determined by the wide spread of such systems. Distinctive features of the software package, for ship information systems, are their large information and logical complexity, significant amounts of programs, work in a limited amount of computing resources, with high demands on the efficiency and reliability of their operation, as well as the pronounced industrial and technical nature of the software at all stages of the life cycle. The main problem associated with the creation of complex software systems is to increase the reliability of programs. One of the most promising ways to solve the problem is the implementation of a detailed regulated technological process. At the same time, the necessary level of regulation is achieved as a result of the structural approach to ensuring reliability at different stages of software life. Among the known ways to improve the reliability of software in this article, special attention is paid to the progressive methods of creating programs and the extensive use of automation tools. Because the underlying technology and its instrumental support is a structural approach to software development. The role and influence of the corresponding structural methods on reliability characteristics of the software functioning is shown. In general, the structural approach allows to increase the efficiency of work with software based on the implementation of the three provisions; ordering and unification of the structural construction of the software complex; ordering the work to eliminate errors; creation of conditions for effective application of technology of assembly programming on the basis of software reserve.

Keywords: ship information systems, reliability, efficiency, software, quality, structure, technological process, integrated indicator, objective function, errors, probability of failures.

For citation:

Goloskokov, Konstantin P., and Marina Yu. Chirkova. "Structural approach to improving the reliability of the software of information systems." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 10.4 (2018): 880–887. DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-4-880-887.

УДК 681.3.06

СТРУКТУРНЫЙ ПОДХОД К ПОВЫШЕНИЮ НАДЕЖНОСТИ ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ИНФОРМАЦИОННЫХ СИСТЕМ

К. П. Голоскоков¹, М. Ю. Чиркова²

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

² — Санкт-Петербургский государственный экономический университет,
Санкт-Петербург, Российская Федерация

Рассматриваемая в статье проблематика в основном связана с обеспечением заданных показателей эффективности и надежности проектируемых комплексов программных средств для судовых информационных систем путем структурного подхода к основным стадиям жизненного цикла программного обеспечения. Актуальность этого класса программного обеспечения определяется широким распространением таких систем. Отличительными особенностями комплекса программ для судовых информационных систем являются их большая информационно-логическая сложность, значительные объемы программ, работа в условиях ограниченного объема ресурсов вычислительных средств при высоких требованиях к эффек-

тивности и надежности их функционирования, а также ярко выраженный производственно-технический характер программных средств на всех стадиях жизненного цикла. Основная проблема, связанная с созданием сложных программных систем, заключается в повышении надежности программ. Одним из перспективных путей решения проблемы является реализация детально регламентированного технологического процесса. При этом необходимый уровень регламентации достигнут в результате структурного подхода к обеспечению надежности на различных стадиях жизни программного обеспечения. Среди известных путей повышения надежности программного обеспечения в настоящей статье особое внимание уделяется прогрессивным методам создания программ и широкому использованию средств автоматизации, поскольку в основе рассматриваемой технологии и ее инструментальной поддержки лежит структурный подход к созданию программного обеспечения. Показана роль и влияние соответствующих структурных методов на характеристики надежности функционирования программного обеспечения. В целом структурный подход позволяет повысить эффективность работы с программным обеспечением на основе реализации трех положений: упорядочивания и унификации структурного построения программного комплекса; упорядочивания работ по устранению ошибок; создания условий для эффективного применения технологии сборочного программирования на основе программного задела.

Ключевые слова: судовые информационные системы, надежность, эффективность, программное обеспечение, качество, структура, технологический процесс, интегрированный показатель, целевая функция, ошибки, вероятность отказов.

Для цитирования:

Голоскоков К. П. Структурный подход к повышению надежности программного обеспечения информационных систем / К. П. Голоскоков, М. Ю. Чиркова // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2018. — Т. 10. — № 4. — С. 880–887. DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-4-880-887.

Введение (Introduction)

Проблема надежности программного обеспечения приобретает особое значение для эксплуатируемых в течение длительного периода времени в условиях экстремальных нагрузок судовых информационных систем реального времени. В них, в первую очередь, выделяются задачи, связанные с выбором и практическим определением показателей качества и критериев оценки качества, задачи анализа сложности программ и создания методов целевого управления сложностью и качеством программ, а также создание методов управления разработкой программ. Опыт создания судовых информационных систем и их эксплуатации привел к формированию такого направления, как надежность программного обеспечения.

Несмотря на общность основных положений надежности программного обеспечения и аппаратной надежности, имеется принципиальная разница в причинах нарушения работоспособности программ [1] – [3]. Применительно к программному обеспечению данная причина заключается в том, что реальные данные, подлежащие обработке, не могут быть обработаны конкретной программой, ориентированной на этот вид обработки. Это связано с тем, что исходные данные, находясь в области допустимых значений, тем не менее, не попали в область, проверенную при тестировании и испытаниях. Под первичной ошибкой, как правило, понимается [4], [5] отклонение исходного текста программы от формализованного эталонного и требований заказчика. Искажения в программе — это те ее элементы, которые подлежат корректировке. Первичная ошибка проявляется при сравнении результатов выполнения программ с каким-либо эталоном.

Основные задачи надежности программного обеспечения судовых информационных систем заключаются [6] – [8] в следующем:

- формирование основных понятий, используемых при исследовании показателей и параметров надежности программного обеспечения;
- выявление и исследовании основных факторов, определяющих характеристики надежности программ;
- исследование характеристик искажений исходных данных от различных типов источников и их влияние на надежность функционирования программ;
- исследование типов ошибок в программах и динамики изменения их количества при отладке;

- разработка и исследование методов проектирования и структурного построения сложных программ, способствующих повышению надежности функционирования;
- исследование средств и методов контроля и защиты от искажений вычислительного процесса путем ввода различных видов избыточности и помехозащищенности, обеспечивающих автоматическое восстановление до исходного состояния;
- разработка методов прогнозирования характеристик надежности.

Методы и материалы (Methods and Materials)

С понятием надежности программ тесно связано понятие ошибок в программах. Результаты анализа ошибок в программах [9], [10] показали, что сложное программное обеспечение не может существовать в абсолютно отлаженном состоянии. Источниками снижения надежности программ являются ошибки [11], [12], [13], вносимые в программы при проектировании, разработке и внедрении. На стадии структурного проектирования возможны ошибки в определении структуры программ.

Взаимосвязь числа ожидаемых и оставшихся по окончании технологического цикла ошибок с системными показателями надежности определяется зачастую спецификой области использования программ. В общем случае системный показатель надежности программ — это вероятность безотказной работы в течение интервала времени t , т. е. до возникновения первого отказа:

$$P(t) = P(T \geq t). \quad (1)$$

Вероятность безотказной работы позволяет определить следующие системные показатели:

- вероятность отказов

$$\Theta(t) = 1 - P(t); \quad (2)$$

- частоту отказов

$$a(t) = \Theta'(t) = 1 - P'(t); \quad (3)$$

- интенсивность отказов

$$\lambda(t) = a(t)/[P(t)] = d \ln P(t)/d(t). \quad (4)$$

С этими системными показателями связано большинство показателей, конкретизированных по отдельным компонентам программного обеспечения и технологическим операциям.

Использование различных математических моделей надежности, предназначенных для оценки показателей надежности программ (например, числа ошибок, оставшихся невыявленными; времени, необходимого для выявления очередной ошибки; времени, необходимого для выявления всех ошибок с заданной вероятностью и др.), позволяет более обоснованно подходить к планированию отладки и испытания программ, глубже понимать природу ошибок и методы их предотвращения, методы эффективного использования избыточности. Каждая из этих моделей базируется на некоторых допущениях и ориентирована на определенный класс программ.

Среди указанных видов ошибок, снижающих надежность программ, особое место занимают первичные ошибки, являющиеся искажениями в исходном тексте программы. Так как первичные ошибки в программах вносятся в их исходные тексты, особое место для оценки надежности программного обеспечения отводится методу, основанному на анализе и контроле статистических характеристик исходных текстов программ.

Результаты (Results)

Использование структурного подхода как основы регламентации технологического процесса и конструктивной организации программ имеет двойкий характер. С одной стороны, структурирование приводит к повышению надежности программ. С другой стороны, структурирование приводит к увеличению затрат и связано с определенными потерями в характеристиках программ, что отрицательно сказывается на их надежности. Для сравнительной оценки и сопоставления двух

направлений действия структуризации предлагается упрощенная модель взаимосвязи структуризации программ и их надежности, позволяющая на качественном уровне сделать вывод о характере этой зависимости.

Считая, что общее приращение числа элементов программы при структуризации равномерно распределено среди каждых M модулей, обозначим среднее приращение на модуль как A :

$$A = \Delta N / M,$$

где ΔN — увеличение числа элементов программы за счет структуризации.

Примем для упрощения распределения ошибок по всем элементам программы равномерной и норму ошибок K на один элемент программы постоянной, т. е.

$$K = n / N = \text{const},$$

где n — число ошибок в монолитном комплексе программ.

Введем понятие *длины поиска ошибок* L , считая, что для поиска ошибок необходимо просмотреть все N элементов комплекса программ. Тогда длина поиска n ошибок составит

$$L = N \cdot n = N^2 K.$$

Длину структурированного комплекса программ считаем равномерно распределенной на M модулей, длина каждого модуля равна $(N + AM) / M$. Число ошибок в структурированном комплексе программ составит $(N + AM) \cdot K$, тогда число ошибок на каждый модуль будет в среднем равно $(N + AM)K / M$.

Поиск ошибок, приходящихся на каждый модуль, происходит только внутри модуля. Это предположение основано на том, что структуризация преследует цель максимальной автоматизации каждого модуля. Таким образом, длина поиска L_c всех ошибок в структурированном комплексе программ определяется соотношением

$$L_c = \frac{N + AM}{M} \frac{(N + AM)KM}{M} = \frac{(N + AM)^2 K}{M},$$

характеризующим взаимосвязь длины поиска полного количества ошибок.

С увеличением общего числа элементов при структуризации и, соответственно, числа ошибок, в комплексе программ M и A приобретают такие значения, при которых длина поиска ошибок в структурированном комплексе меньше длины поиска ошибок в монолитном комплексе программ. Для определения условий, при которых $L_c < L$, можно ввести характеристику длины программного модуля $N_0 = N / M$.

Решая систему уравнений:

$$L_c = M (N_0 + A)^2 K;$$

$$L = KN_0^2 M^2$$

получаем, что $L_c < L$, когда $M > (1 + \Delta N / N)^2$. Отсюда следует, что даже при увеличении в два раза объема структурированного программного комплекса его длина будет меньше.

Технологический процесс создания программ можно представить в виде совокупности операций, полученной в результате детализации регламентированной последовательности этапов и стадий применительно к конкретным условиям использования технологии. Такая регламентация и детализация технологического процесса создания программных средств направлена, в первую очередь, на достижение заданных технических показателей качества. В общей технологической схеме можно представить цель каждого этапа и операции в реализации тех или иных составляющих показателей качества, а затем сформировать интегрированный показатель. Такой интегрированный показатель качества создаваемого программного средства может быть определен в виде соотношения $\Pi = F(\Pi_l)$, где $l = 1 \dots m$ — номер показателя; Π_l — значение l -го показателя качества; m — число используемых показателей. Учитывая вклад и роль каждого технологического этапа или операции в достижении заданного пока-

зателя, можно вывести соотношение для определения каждого l -го показателя качества в виде $\Pi_l = F(\Pi_{li})$, где $i = 1 \dots k$ — текущий номер; k — количество этапов и операций. Цель технологического процесса заключается в оптимизации по некоторому заранее заданному критерию значения интегрального показателя качества:

$$\text{Ц} = \text{opt}[\Phi(F(\Pi_{li}))]; l = 1 \dots m; i = 1 \dots k.$$

Конкретный вид функций F и Φ определяется видом соответствующих показателей и особенностями технологии. Степень достижения целевой функции технологии определяет ее качество.

Введенные формализованные соотношения позволяют проводить количественные оценки при выборе конкретных технологий для создания программных средств. При этом системный показатель надежности — вероятность безотказной работы программы P_l — определяется соотношением

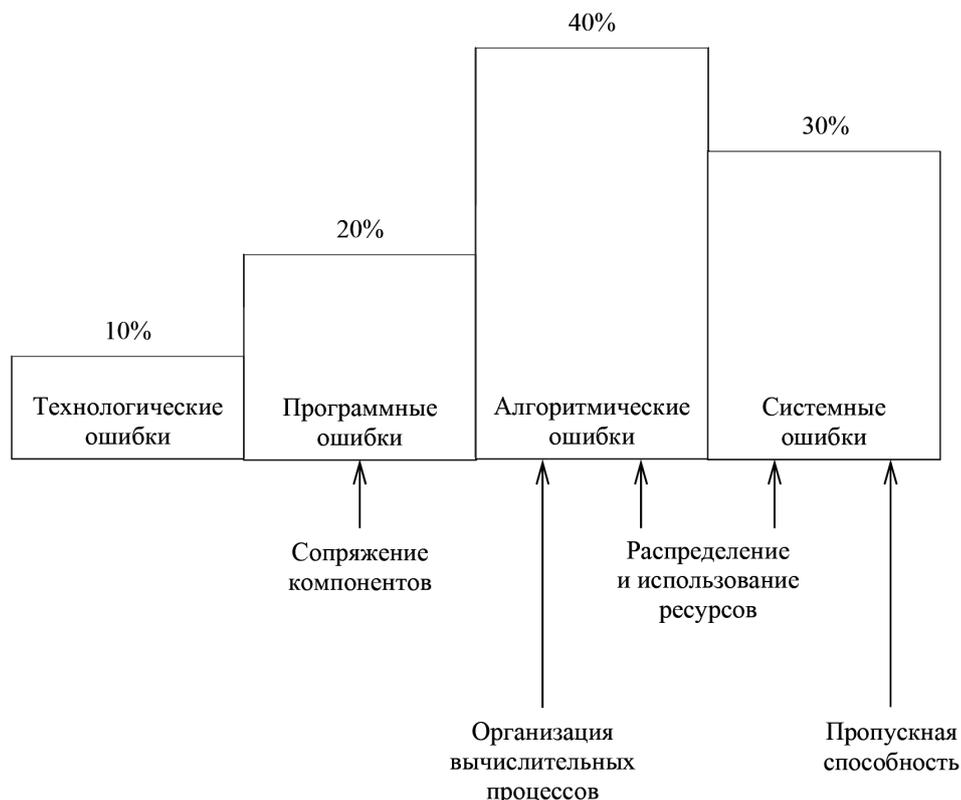
$$P_l = F(\Pi_{li}) = \prod_{i=1}^k P_i,$$

т. е. произведением вероятностей безотказной работы, рассчитываемых по формуле (1), достигаемых на каждом технологическом этапе. Применительно к рассматриваемым показателям качества целевая функция приобретает вид

$$\text{Ц} = \max[\prod_{i=1}^k P_i],$$

где P_i вычисляются по формуле (1). Аналогично для каждого технологического этапа можно рассчитать остальные показатели надежности $\Theta(t)$, $a(t)$, $\lambda(t)$ соответственно по формулам (2) – (4).

При использовании детализированных по технологическим операциям показателей надежности целевая функция учитывает интегрированность системного показателя. Показано, что все ошибки могут быть отнесены к четырем классам имеющихся в комплексах программ. На рисунке представлены эти классы и их процентное соотношение, а также указаны основные группы ошибок, предотвращаемых за счет методологии структурирования.



Группы ошибок, предотвращаемых структурным проектированием

Обсуждение (Discussion)

Все технологии и средства автоматизации, поддерживающие процесс создания программного обеспечения судовых информационных систем, должны ориентироваться на решение проблемы повышения надежности функционирования. В настоящее время достигнуты значительные результаты в исследовании этих проблем, которые позволяют выделить пути повышения надежности программ указанного класса:

- разработка методологической теории надежности программного обеспечения, включающая исследования методов анализа надежности программ, выбор и обоснование критериев, исследование видов ошибок, причин их появления и законов распределения;
- разработка и внедрение программных методов проектирования сложных программ;
- разработка методов оценки и прогнозирования характеристик надежности, особенно на ранних стадиях создания программного обеспечения, методов своевременного предупреждения и локализации ошибок, методов измерения статистических характеристик, определяющих устойчивость функционирования и надежность программ;
- разработка методов сопровождения программ и их модернизации в условиях длительной эксплуатации.

Основным результатом проведенного авторами исследования является структурирование видов ошибок программного обеспечения. В результате структурного подхода к проектированию определен интегрированный показатель качества программного обеспечения и сформулирована цель технологического процесса, которая заключается в оптимизации по некоторому заранее заданному критерию значения интегрального показателя качества.

Заключение (Conclusion)

В статье сформированы основные принципы, используемые при исследовании показателей и параметров надежности программного обеспечения судовых информационных систем. Разработана и исследована методология проектирования и структурного построения сложных комплексов программ, способствующих повышению надежности их функционирования. Определена структурная надежность как степень достижения вероятности безотказной работы программ, обеспечиваемой на технологических этапах, поддерживающих структурный подход к созданию программ.

Результаты исследования необходимы при разработке сложных комплексов программного обеспечения судовых информационных систем. Представленная в статье методология структурного проектирования сложного комплекса программных средств уже на стадии проектирования позволяет предотвратить значительное количество ошибок за счет детализации по технологическим операциям показателей надежности.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Буторов В. В.* Оценка надежности клиент-серверных приложений корпоративной системы управления предприятием / В. В. Буторов, С. В. Тынченко, Р. Ю. Царев // *Фундаментальные исследования*. — 2015. — № 5–3. — С. 488–492.
2. *Кузнецов А. С.* Многоэтапный анализ архитектурной надежности и синтез отказоустойчивого программного обеспечения сложных систем: монография / А. С. Кузнецов, С. В. Ченцов, Р. Ю. Царев. — Красноярск: Изд-во Сибирского федерального ун-та, 2013. — 143 с.
3. *Любицын В. Н.* Необходимость разработки надежного программного обеспечения как вызов современности / В. Н. Любицын // *Вестник Южно-Уральского государственного университета*. Серия: Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника. — 2012. — № 23. — С. 26–29.
4. *Царев Р. Ю.* Модель анализа надежности распределенных вычислительных систем / Р. Ю. Царев, А. Н. Пупков, М. А. Огнерубова [и др.] // *Вестник Сибирского государственного аэрокосмического университета им. академика М. Ф. Решетнева*. — 2013. — № 1 (47). — С. 86–91.

5. Павловская О. О. Статические методы оценки надежности программного обеспечения / О. О. Павловская // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника. — 2009. — № 26 (159). — С. 35–37.
6. Гражданцев Е. В. Практическая реализация надежностного анализа архитектуры программной системы / Е. В. Гражданцев, М. А. Русаков, О. И. Завьялова, Р. Ю. Царев // Вестник Сибирского государственного аэрокосмического университета им. академика М. Ф. Решетнева. — 2008. — № 1 (18). — С. 37–40.
7. Царев Р. Ю. К проблеме оценки надежности сложных программных систем / Р. Ю. Царев, Е. Н. Штарик, А. В. Штарик // Журнал Сибирского федерального университета. Серия: Техника и технологии. — 2015. — Т. 8. — № 1. — С. 33–47.
8. Царев Р. Ю. Методология многоатрибутивного формирования мультиверсионного программного обеспечения сложных систем управления и обработки информации: монография / Р. Ю. Царев. — Красноярск: Изд-во Красноярского гос. аграрного ун-та, 2011. — 210 с.
9. Avizienis A. On the implementation of N-version programming for software fault-tolerance during program execution / A. Avizienis, L. Chen // Proc. IEEE Comput Soc Int Comput Software & Appl Conf, COMPSAC '77. — 1977. — Pp. 149–155.
10. Hac A. Using a software reliability model to design a telecommunications software architecture / A. Hac // IEEE Transactions on Reliability. — 1991. — Vol. 40. — Is. 4. — Pp. 488–494. DOI: 10.1109/24.93771.
11. Голоскоков К. П. Прогнозирование технического состояния изделий судовой электронной техники / К. П. Голоскоков. — СПб.: ПаркКом 2007. — 148 с.
12. Голоскоков К. П. Прогнозирование и оценка технического состояния сложных систем / К. П. Голоскоков // Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского гос. политехн. ун-та. — 2008. — № 53. — С. 164–168.
13. Голоскоков К. П. Формирование информационной базы для прогнозирования качества продукции / К. П. Голоскоков // Инновации. — 2009. — № S1. — С. 91–94.

REFERENCES

1. Butorov, V.V., S.V. Tynchenko, and R.Y. Tsarev. “Estimation of the reliability of client-server applications for a corporate enterprise management system.” *Fundamental research* 5-3 (2015): 488–492.
2. Kuznetsov, A.S., S.V. Chentsov, and R.Yu. Tsarev. *Mногоэтапный анализ архитектурной надежности и синтез отказоустойчивого программного обеспечения сложных систем: монография*. Krasnoyarsk: Sibirskii federal'nyi universitet, 2013.
3. Lyubitsyn, Vladimir Nikolaevich. “The necessity of reliable software development as a challenge of modern age.” *Bulletin of the South Ural State University. Series: Computer Technologies, Control, Radio Electronics* 23 (2012): 26–29.
4. Tsarev, R.Yu., A.N. Pupkov, M.A. Ognerubova, M.V. Serzhantova, and N.A. Beschastnaya. “Model of analysis of distributed computing systems reliability.” *Vestnik Sibirskogo gosudarstvennogo aerokosmicheskogo universiteta im. akademika M.F. Reshetneva* 1(47) (2013): 86–91.
5. Pavlovskaya, Olga Olegovna. “Static methods of assessment of software.” *Bulletin of the South Ural State University. Series: Computer Technologies, Control, Radio Electronics* 26(159) (2009): 35–37.
6. Grazhdantsev, E.V., M.A. Rusakov, O.I. Zavyalova, and R.Ju. Tsarev. “Practical realization of reliability analysis of software architecture.” *Vestnik Sibirskogo gosudarstvennogo aerokosmicheskogo universiteta im. akademika M.F. Reshetneva* 1(18) (2008): 37–40.
7. Tsarev, Roman Yu., Elena N. Shtarik, and Andrey V. Shtarik. “Toward the Problem of Estimation of the Complex Software System Reliability.” *Journal of Siberian Federal University* 8.1 (2015): 33–47.
8. Tsarev, R.Yu. *Metodologiya mnogoatributivnogo formirovaniya mul'tiversionnogo pro-grammnogo obespecheniya slozhnykh sistem upravleniya i obrabotki informatsii: monografiya*. Krasnoyarsk: Krasnoyar. gos. agrar. un-t, 2011.
9. Avizienis, A., and L. Chen. “On the implementation of N-version programming for software fault-tolerance during program execution.” *Proc. IEEE Comput Soc Int Comput Software & Appl Conf, COMPSAC '77*. 1977. 149–155.
10. Hac, Anna. “Using a software reliability model to design a telecommunications software architecture.” *IEEE Transactions on Reliability* 40.4 (1991): 488–494. DOI: 10.1109/24.93771.

11. Goloskokov, K.P. *Prognozirovanie tekhnicheskogo sostoyaniya izdelii sudovoi elektronnoi tekhniki*. SPb., 2007.
12. Goloskokov, K. P. “Prognozirovanie i otsenka tekhnicheskogo sostoyaniya slozhnykh system.” *Nauchno-tekhnicheskie vedomosti Sankt-Peterburgskogo gosudarstvennogo politekhnicheskogo universiteta* 53 (2008): 164–168.
13. Goloskokov, Konstantin Petrovich. “Formation the information base for predicting product quality.” *Innovations S1* (2009): 91–94.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Голоскоков Константин Петрович —
доктор технических наук, профессор
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала
С.О. Макарова»
198035, Российская Федерация, Санкт-Петербург,
ул. Двинская, 5/7
e-mail: goloskokovkp@gumrf.ru
Чиркова Марина Юрьевна —
кандидат экономических наук, доцент
Санкт-Петербургский государственный
экономический университет
191023, Российская Федерация, Санкт-Петербург,
ул. Садовая, 21
e-mail: mu.tch@mail.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Goloskokov, Konstantin P. —
Doctor of Technical Sciences, professor
Admiral Makarov State University of Maritime
and Inland Shipping
5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg, 198035,
Russian Federation
e-mail: goloskokovkp@gumrf.ru
Chirkova, Marina Yu. —
PhD, associate professor
Saint Petersburg State University
of Economics
21 Sadovaya Str., St. Petersburg, 191023,
Russian Federation
e-mail: mu.tch@mail.ru

*Статья поступила в редакцию 14 июня 2018 г.
Received: June 14, 2018.*

Научное периодическое издание

**Вестник Государственного университета морского
и речного флота имени адмирала С. О. Макарова**

Том 10. № 4

2018 год

Выпускающий редактор *Н. А. Карамзина*

Редактор *Т. В. Середова*

Дизайн и верстка *М. Н. Евсюткина*

Технический редактор *Е. И. Тюленева*

Подписано в печать с оригинал-макета 22.08.18. Формат 60×90/8
Гарнитура Times New Roman. Усл. печ. л. 28,75. Тираж 500 экз. Заказ № 502/2018

Государственный университет морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова
198035, Санкт-Петербург, ул. Двинская, 5/7