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. № 6

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

САНКТ-ПЕТЕРБУРГ
2018

ББК 95

Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — СПб.: ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова, 2018. — Т. 10. — № 6. — 208 с.

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

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

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

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

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

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

ISSN 2309-5180
9 772309 518784 >

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

СОДЕРЖАНИЕ

Том 10. № 6

2018

ЭКСПЛУАТАЦИЯ ВОДНОГО ТРАНСПОРТА, СУДОВОЖДЕНИЕ 1111

Смоленцев С. В., Исаков Д. В. Моделирование движения судна на основе упрощенной кинематической модели 1111

Ершов А. А., Буклис П. И. Способы увеличения скорости и экономии топлива танкера при штормовом плавании 1122

Афонин А. Б. Комплексная оценка безопасности плавания в акватории Северного морского пути 1132

Андреев А. А. Способы разрушения ледяного массива с помощью наклонных азиподов при плавании в Арктике 1143

Зуб И. В., Ежов Ю. Е., Сидоренко В. А. Современные требования к правилам технической эксплуатации портового перегрузочного оборудования 1152

Ситов А. Н., Маловечко В. А., Слицан А. Е. Морская перевозка железа прямого восстановления навалом 1162

Кузнецов А. Л., Кириченко А. В., Щербакова-Слюсаренко В. Н. Направления цифровизации транспортной отрасли 1179

Андрюшечкин Ю. Н., Столповский Д. Ю., Рудых С. В. Анализ технических характеристик при выборе систем обработки балластных вод для судов «река – море» плавания 1191

Жмур А. А., Логиновский В. А. Применение теории владения ситуацией при изучении отчетов о расследованиях случаев посадки судов на мель 1200

ВОДНЫЕ ПУТИ СООБЩЕНИЯ И ГИДРОГРАФИЯ 1211

Иванов Р. В., Полубелов Д. А., Соболева А. А. Характеристика ледовых условий работы гидрографических судов в Карском море 1211

Ольховик Е. О. Исследование изменения структуры транспортного флота в акватории Северного морского пути 1225

Зубрилов С. П. Исследование структуры воды и ее стабилизация кислородом 1234

СУДОВЫЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ УСТАНОВКИ, СИСТЕМЫ И УСТРОЙСТВА 1244

Жуков В. А., Яманин А. И., Мельник О. В. Двигатели с шеститактным рабочим циклом: порядок работы и схемы коленчатых валов 1244

Клюшенкова М. И., Назаров В. И., Попов А. П. Техника и технология поддержания жизни в замкнутом пространстве 1255

ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ КОМПЛЕКСЫ И СИСТЕМЫ 1264

Сугаков В. Г., Варламов Н. С., Малышев Ю. С. Вольтодобавочный корректор напряжения с использованием эталонной формы напряжения 1264

РЕДАКЦИОННЫЙ СОВЕТ

Гл. редактор

С. О. Барышников,

д.т.н., проф.

rector@gumrf.ru

Зам. гл. редактора

А. П. Ныркov,

д.т.н., проф.

NyrkowAP@gumrf.ru

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

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

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

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

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

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

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

РЕДАКЦИЯ:

E-mail: journal@gumrf.ru

http://journal.gumrf.ru

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

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

Подписной индекс в каталоге Роспечать — 37276.

Все материалы, поступившие в редакцию, рецензируются.

Члены редколлегии:

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

Романовский В. В., Никифоров Б. В., Макаров А. М. Выбор и обоснование конструкции электроэнергетических систем глубоководного подводного аппарата 1277

ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И АВТОМАТИЗАЦИЯ НА ТРАНСПОРТЕ 1288

Ныркова А. П., Алексеев С. А., Стахно Р. Е. Структурно-функциональная модель обучающегося в системе тренажерной подготовки по судовождению 1288

Майоров Н. Н. Прогнозирование развития морских пассажирских терминалов и сети паромных линий в регионе балтийского моря 1299

CONTENST

OPERATION OF WATER TRANSPORT, NAVIGATION 1111

Smolentsev S. V., Isakov D. V. Simulation of ship movement based on a simplified kinematic model 1111

Ershov A. A., Buklis P. I. Ways to increase speed and save fuel tanker in storm conditions 1122

Afonin A. B. A comprehensive assessment of the safety of navigation in the water area of the Northern sea route 1132

Andreev A. A. The fracture mechanism for ice blocks by propeller jet from inclined azipod in the Arctic region 1143

Zub I. V., Ezhov Yu. E., Sidorenko V. A. Modern requirements to the rules of technical operation of port handling equipment 1152

Sitov A. N., Malovechko V. A., Slitsan A. E. Sea transportation of direct reduced iron in bulk 1162

Kuznetsov A. L., Kirichenko A. V., Shcherbakova-Slyusarenko V. N. The directions of the transport industry digitalization 1179

Andryushechkin Y. N., Stolpovskii D. Y., Rudy'kh S. V. Analysis of technical characteristics at the selection of ballast water treatment systems for vessels of mixed navigation area 1191

Zhmur A. A., Loginovsky V. A. Using a situation awareness theory in a study of grounding incident investigations 1200

WATERWAYS AND HYDROGRAPHY 1211

Ivanov R. V., Polubelov D. A., Soboleva A. A. Ice condition features of hydrographic vessels for work in Kara sea 1211

Ol'khovik E. O. Research of changes in the transport fleet structure in the water area of the Northern Sea Route 1225

Zubrilov S. P. Investigation of water structure and its oxygen stabilization 1234

SHIP POWER PLANTS, SYSTEMS AND DEVICES 1244

Zhukov V. A., Yamanin A. I., Melnik O. V. Six storke engines: operating procedure and schemes of crankshafts 1244

Klyushenkova M. I., Nazarov V. I., Popov A. P. Technique and technology of maintaining life in a confined space 1255

ELECTRICAL EQUIPMENT AND SYSTEMS 1264

Sugakov V. G., Varlamov N. S., Malyshev Yu. S. Booster voltage corrector with use of standard voltage form 1264

Romanovsky V. V., Nikiforov B. V., Makarov A. M. Selection and justification of the design electric power systems of deep water underwater apparatus 1277

Volume 10. № 6

2018

EDITOR-IN-CHIEF

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

INFORMATION TECHNOLOGY AND AUTOMATION IN TRANSPORT 1288

Nyrkov A. P., Alekseev S. A., Stahno R. E. The structural-functional model of a trainee in the system of training simulator for navigation 1288

Maiorov N. N. Forecasting of the evolution of sea passenger terminals and network of ferry lines in the region of the Baltic sea 1299

ЭКСПЛУАТАЦИЯ ВОДНОГО ТРАНСПОРТА, СУДОВОЖДЕНИЕ

DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-6-1111-1121

SIMULATION OF SHIP MOVEMENT BASED ON A SIMPLIFIED KINEMATIC MODEL

S. V. Smolentsev, D. V. Isakov

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

The article discusses the problem of synthesis of the trajectory of the vessel. The solution of this problem is important or the development of automatic ship control systems. In particular, it is solved in the system of automatic collision avoidance systems. One of the components of this system is the ship's movement modeling subsystem. This subsystem synthesizes the prediction of the trajectory of the movement of both own vessel and target ships in the water area.

The article proposed a simple kinematics model of vessel dynamics. The number of parameters of this model is minimal. With the use of this model and data on the route of the vessel (Voyage plan), the trajectory of the vessel can be synthesized. An algorithm for modeling the movement of the vessel is proposed. The trajectory of the vessel is obtained by integrating the proposed equations.

To use the proposed models of dynamics, it is necessary to set their parameters. The parameters of the dynamics models depend on the type of vessel, its tonnage and dimensions. In addition, they are different for a ship in ballast and full loaded.

The problems of identification of the model parameters is considered. A method of identifying the parameters of the model of the ship's dynamics according to the data from the maneuvering booklet is proposed. The maneuvering booklet contains information about the ship's motion when performing standard maneuvers course and speed. Its presence on the ship is mandatory in accordance with IMO Resolution A.601 (15).

The proposed method allows to calculate the parameters of the model of the vessel's circulation dynamics during turning and the parameters of the model of the vessel's dynamics during deceleration and acceleration. The article presents an example of identifying the parameters of a vessel model for a tanker with a displacement of 69 thousand tons and a length of 230 meters. The advantages and disadvantages of the proposed model of vessel dynamics are considered.

Keywords: modeling, trajectory of the vessel, kinematic model, maneuvering booklet.

For citation:
Smolentsev, Sergey V., and Dmitry V. Isakov. "Simulation of ship movement based on a simplified kinematic model." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova* 10.6 (2018): 1111–1121. DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-6-1111-1121.

УДК 656.61.052

МОДЕЛИРОВАНИЕ ДВИЖЕНИЯ СУДНА НА ОСНОВЕ УПРОЩЕННОЙ КИНЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ

С. В. Смоленцев, Д. В. Исаков

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

В статье рассматривается задача синтеза траектории движения судна. Решение этой задачи является актуальным для построения систем автоматического управления судном. В частности, она решается в системе автоматического расхождения судов. Одним из компонентов этой системы является подсистема моделирования движения судов, с помощью которой строят прогноз траектории движения

как собственного судна, так и судов-целей в акватории. В статье предложена простая кинематическая модель динамики судна. Количество параметров данной модели минимально. С использованием этой модели и данных о маршруте судна (Voyage plan) может быть синтезирована траектория его движения. Представлен алгоритм моделирования движения судна. Траекторию движения судна получают путем интегрирования предложенных уравнений. Для использования предложенных моделей динамики необходимо задать их параметры. Параметры моделей динамики зависят от типа судна, его тоннажа и размерений. Кроме того, они различны для судна в балласте и грузу.

В статье рассмотрены вопросы идентификации параметров модели. Предложена методика идентификации параметров модели динамики судна по данным из маневренного буклета. Маневренный буклет содержит информацию о поведении судна при выполнении стандартных маневров курсом и скоростью. Его наличие на судне обязательно в соответствии с Резолюцией ИМО А.601(15).

Предложенная методика позволяет находить параметры модели динамики судна на циркуляции при повороте и параметры модели динамики судна при торможении и разгоне. В статье приведен пример идентификации параметров модели судна для танкера водоизмещением 69 тыс. тонн и длиной 230 м. Рассмотрены преимущества и недостатки предложенной модели динамики судна.

Ключевые слова: моделирование, траектория движения судна, кинематическая модель, маневренный буклет.

Для цитирования:
Смоленцев С. В. Моделирование движения судна на основе упрощенной кинематической модели / С. В. Смоленцев, Д. В. Исаков // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2018. — Т. 10. — № 6. — С. 1111–1121. DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-6-1111-1121.

Введение (Introduction)

В настоящее время большое внимание уделяется проблеме беспилотного судоходства, для решения которой разрабатываются различные системы автоматического управления судном в море. Одной из таких систем является автоматическая система расхождения судов [1]. Для корректной работы подобных систем необходимо решить задачу прогноза развития навигационной ситуации, в частности задачу прогнозирования траекторий движения судов в море на заданный промежуток времени (период прогноза).

Разработке принципов создания систем автоматического управления движением судов посвящено много работ, например, труды Вагущенко [2], [3]. На кафедре автоматики и вычислительной техники ГУМРФ им. адм. С. О. Макарова разработана интеллектуальная система расхождения судов, которая решает задачу безопасного расхождения группы судов с учетом требований МППСС-72 [4], навигационных условий, а также хорошей морской практики. Основные принципы построения этой системы и различные аспекты ее функционирования изложены в работах [5], [6]. Одним из компонентов этой системы является *подсистема моделирования движения судов*, с помощью которой строят прогноз траектории движения как собственного судна, так и судов-целей в акватории.

Проблеме разработке математических моделей движения судна посвящено большое количество работ, как отечественных [7]–[10], так и зарубежных [11]–[13]. Принципы создания моделей динамики судов по данным маневренного буклета изложены в работе [14]. В данной статье представлены алгоритмы работы системы моделирования движения судов в море на основе упрощенных моделей динамики судов. Кроме того, предложена методика идентификации параметров модели динамики судна по данным маневренного буклета.

Методы и материалы (Methods and Materials)

Для решения задачи прогнозирования навигационной ситуации необходимо строить прогнозы траекторий движения судов. Для этого следует использовать модель динамики судов. Траектория движения судна на заданный промежуток времени строится с использованием его текущего состояния, заданного маршрута движения (VP — Voyage Plan) и соответствующей модели динамики судна:

$$Tr = f_{Tr}(S_t, VP, V), \tag{1}$$

где S_t — вектор текущего состояния судна;

VP — заданный маршрут движения судна;

M — модель динамики судна.

Результирующая траектория представляет собой массив точек, каждая из которых содержит координаты и элементы движения в данной точке:

$$Tr = \{P_i\}_{i\in[0,\, I_F)}, \tag{2}$$

где $P_t =< F_t, L_t, K_t, V_t, \omega_t, a_t^t, a_t^s >$ — точка траектории;

I_F — количество точек траектории (зависит от установленного периода прогноза).

Маршрут движения задается как массив поворотных точек, каждая из которых содержит координаты точки поворота (изменения скорости) и значение скорости на следующем участке маршрута:

$$VP = \{P_i\}_{i\in[0,\, I_M)}, \tag{3}$$

где $P_i =< F_i, L_i, K_i, V_i >$ — поворотная точка маршрута;

I_M — количество точек в маршруте.

В данной работе будут рассмотрены вопросы использования в качестве модели динамики судна упрощенной кинематической модели, построенной по данным маневренного буклета.

Результаты (Results)

Упрощенная кинематическая модель судна. Множество параметров модели динамики судна можно представить в следующем виде

$$M =< \{MTP_R^j, MTP_L^j\}_{j\in J}, MSP >, \tag{4}$$

где MTP_C^j — параметры поворота для стандартных перекладках руля (обычно J = [15, 35] или J = [10, 20, 35], $C = R/L$ — правый или левый борт);

MSP — параметры торможения / разгона.

Параметры поворота включают следующие компоненты:

$$MPT =< L_0, \omega, a_т >, \tag{5}$$

где L_0 — мертвый промежуток;

ω — угловая скорость поворота;

$a_т$ — ускорение торможения при повороте.

Параметры торможения включают следующие компоненты:

$$MSR = < \{RPM_i\}_{i\in I}, A, B, A_R, B_R, C_R, \alpha >, \tag{6}$$

где $\{RPM_i\}_{i\in I}$ — набор оборотов винта (RPM) для фиксированных ходов судна (ППХ, СПХ, МПХ, СМПХ);

A, B — коэффициенты модели скорости (7):

$$V = A \cdot RPM + B; \tag{7}$$

A_R, B_R, C_R — коэффициенты модели ускорения разгона (8):

$$a_R = A_R \cdot RPM^2 + B_R \cdot RPM + C_R; \tag{8}$$

α — коэффициент модели ускорения торможения (9):

$$a = \alpha V^2. \tag{9}$$

Схема алгоритма моделирования траектории движения судна показана на рис. 1.

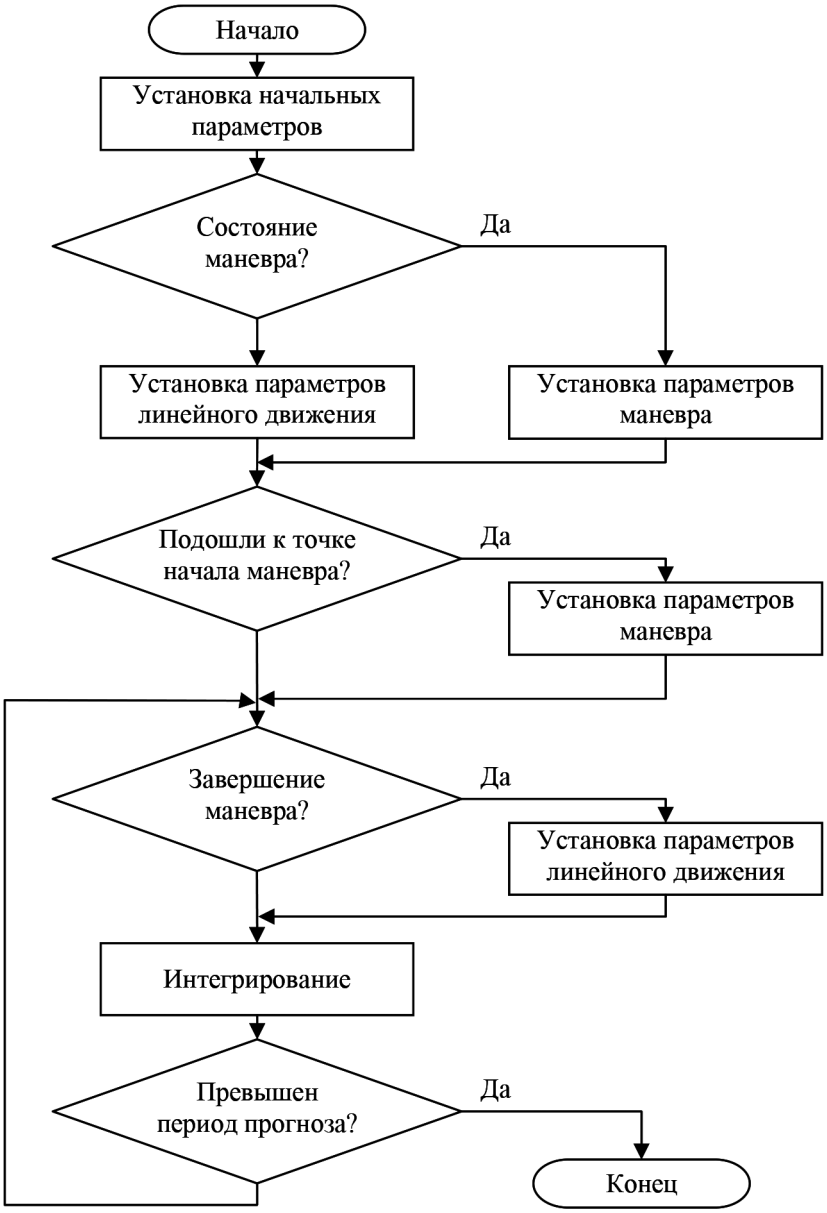


Рис. 1. Схема алгоритма моделирования траектории движения судна

Параметры линейного движения задаются в виде

$$a_т = 0,\ \omega = 0. \tag{10}$$

Параметры маневра (для поворота) определяются из модели судна в зависимости от угла между двумя отрезками маршрута. Поскольку в модели судна задаются параметры для фиксированных углов кладки руля, в зависимости от угла поворота ΔK определяют предполагаемый угол кладки руля β по следующим правилам:

$$\begin{gathered} |\Delta K| < 60° \rightarrow \beta = 10°; \\ 60° \le |\Delta K| < 120° \rightarrow \beta = 15°; \\ |\Delta K| > 120° \rightarrow \beta = 20°. \end{gathered} \tag{11}$$

Соответственно значение параметров модели для выбранного угла перекладки руля β находят интерполяцией по следующей формуле (для J = [15], [35]):

$$X^{\beta} = X^{15} + (X^{35} - X^{15}) \cdot (\beta - 15)/20, \quad (12)$$

где X — один из параметров модели.

В блоке интегрирования рассчитывают текущие параметры движения по следующим формулам (dt — шаг интегрирования):

$$a_S = \alpha \cdot V_t^2 - (A_R \cdot RPM_t^2 + B_R \cdot RPM_t + C_R);$$

$$a_{t+1} = a_S + a_т;$$

$$V_{t+1} = V_t + a_{t+1} \cdot dt;$$

$$K_{t+1} = K_t + \omega \cdot dt;$$

$$dVF_{t+1} = V_{t+1} \cdot \cos(K_{t+1}); \quad (13)$$

$$dVL_{t+1} = V_{t+1} \cdot \sin(K_{t+1}) / \cos(F_t);$$

$$F_{t+1} = F_t + dVF_{t+1} \cdot dt;$$

$$L_{t+1} = L_t + dVL_{t+1} \cdot dt.$$

Идентификация параметров модели. Для использования приведенных выше моделей динамики необходимо определить их параметры. Конвенция SOLAS-74 с поправками, вступившими в силу 1 сентября 1984 г., предусматривает наличие на борту информации о маневренных характеристиках судна (Chapter II-I, Regulation 28). Данный документ рекомендует использовать Резолюцию IMO A.601(15), принятую 19 ноября 1987 г., в качестве образца предоставления этой информации.

В соответствии с Резолюцией IMO A.601(15) «Provision and Display of Manoeuvring Information on Board Ships» («Представление на судах информации о маневренных характеристиках») [15] и MSC.137 (76) от 5 декабря 2002 г. «Стандарты маневренных качеств судна» [16], а также Циркулярным письмом Комитета по безопасности на море MSC.1053 от 5 декабря 2002 г. «Пояснительные записки к стандартам маневренных качеств судна» [17] маневренные качества судна должны оцениваться по характеристикам маневренности, полученным при ходовых испытаниях и подтвержденных компьютерными вычислениями на основе математического моделирования.

Одним из документов, который должен находиться на судне в соответствии с этой Резолюцией, является «Маневренный буклет» (далее — МБ). В нем представлена информация о поведении судна при выполнении стандартных маневров курсом и скоростью, используя которую можно выполнить идентификацию параметров моделей динамики судна.

Идентификация параметров модели поворота. В соответствии с формулой (5), параметрами поворота являются:

L_0 — мертвый промежуток;

E — угловая скорость поворота;

$a_т$ — ускорение торможения при повороте.

Причем набор этих параметров необходимо определить для каждого типового маневра поворотом левого и правого борта. В зависимости от данных, представленных в МБ, типовые повороты могут быть на 15 и 35° или на 10, 20 и 35°. На рис. 2 и в табл. 1 приведены данные по повороту на 10° правого борта из МБ для танкера водоизмещением 69 тыс. т и длиной 230 м. Кроме того, необходимо определить наборы данных параметров для двух условий: движения судна в грузу и в балласте.

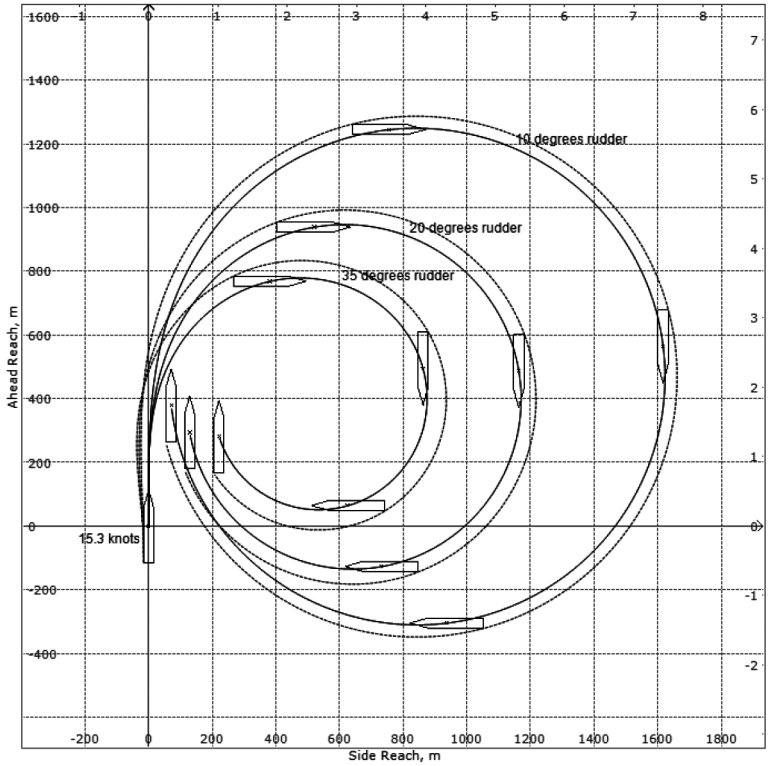


Рис. 2. Поворот на правый борт (данные из «Маневренного буклета»)

Таблица 1

Данные из «Маневренного буклета» о повороте судна на 10° правого борта

Change of Heading, deg	Time from W/O, min-s	Speed after turn, knots	Rate of turn, deg/min	Ahead Reach, m	Side Reach, m
10	0-54	15.0	21.8	426	13
20	1-19	14.7	27.2	613	49
30	1-40	14.4	29.2	761	102
40	2-01	14.0	29.9	895	178
50	2-20	13.7	30.0	1000	263
60	2-41	13.4	29.9	1098	374
70	3-02	13.2	29.6	1172	499
80	3-21	13.0	29.3	1218	618
90	3-42	12.8	28.9	1245	755
100	4-03	12.6	28.6	1248	893
110	4-23	12.4	28.3	1228	1025
120	4-45	12.3	28.0	1183	1158
130	5-07	12.1	27.7	1116	1279
140	5-27	12.0	27.5	1037	1377
150	5-49	11.9	27.3	936	1468
160	6-11	11.8	27.1	820	1539
170	6-35	11.8	26.9	684	1593
180	6-55	11.7	26.7	565	1617
270	10-21	11.3	26.0	-305	936
360	13-51	11.2	25.7	380	71

Идентификация параметров модели поворота выполняется с использованием MS Excel. Методика идентификации параметров модели состоит в следующем:

– заносятся данные об элементах движения судна на маневре, полученные из МБ (см. табл. 1);

– с использованием модели (13) и заданных начальных параметров рассчитывают элементы движения судна при повороте до 180° с дискретностью 1 с;

– рассчитывают суммарное отклонение элементов движения модели от представленных в МБ в моменты времени, заданные в МБ (см. табл. 1);

– варьируя параметрами модели, минимизируют суммарное отклонение элементов движения модели от представленных в МБ.

Сравнительные траектории движения судна по модели (13) и данным МБ в процессе идентификации параметров модели показаны на рис. 3.

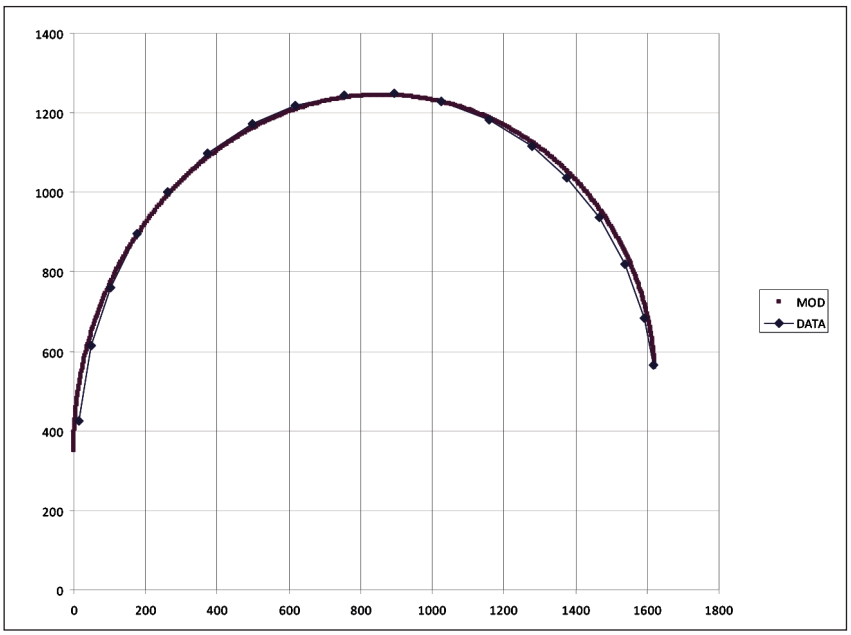


Рис. 3. Траектории движения судна на повороте
по модели и данным из «Маневренного буклета»

Идентификация параметров модели скорости

Как отмечалось ранее, параметрами модели скорости (6) являются:

$\{RPM_i\}_{i\in I}$ — набор оборотов винта (RPM) для фиксированных ходов судна (ППХ, СПХ, МПХ, СМПХ);

A, B — коэффициенты зависимости скорости от оборотов винта;

A_R, B_R, C_R — коэффициенты модели ускорения разгона;

α — коэффициент модели ускорения торможения.

Необходимо определять два набора данных параметров: для движения судна в грузу и в балласте. Для этого можно использовать данные МБ.

В табл. 2 и на рис. 4 приведены примеры информации из МБ о характеристиках главного двигателя и маневренных характеристиках при торможении танкера водоизмещением 69 тыс. т и длиной 230 м.

Таблица 2

**Данные из «Маневренного буклета»
о характеристиках главного двигателя**

Engine order	Propeller RPM	Speed, Knots	Power, kW	Pitch ratio
FSAH	110.0	15.3	7695.0	0.63
FAH	94.0	13.2	4877.0	0.63
HAH	75.0	10.7	2559.0	0.63
SAH	60.0	8.7	1379.0	0.63
DSAH	45.0	6.5	661.0	0.63
DSAS	-20.0	-1.4	115.0	0.63
SAS	-40.0	-2.8	568.0	0.63
HAS	-60.0	-4.2	1635.0	0.63
FAS	-72.0	-5.0	2700.0	0.63

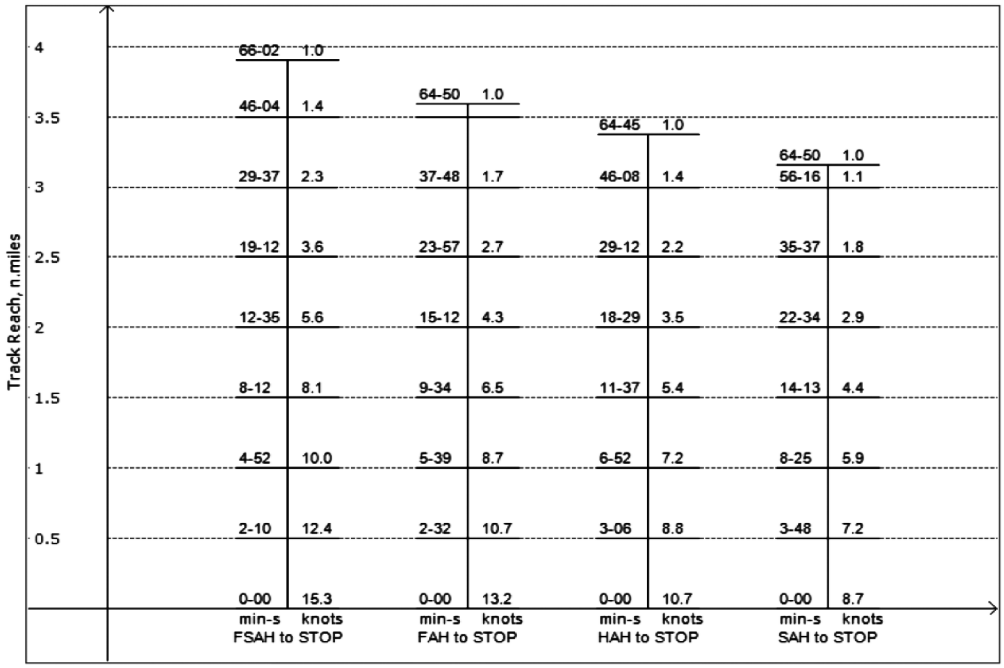


Рис. 4. Данные из «Маневренного буклета» об элементах движения при торможении

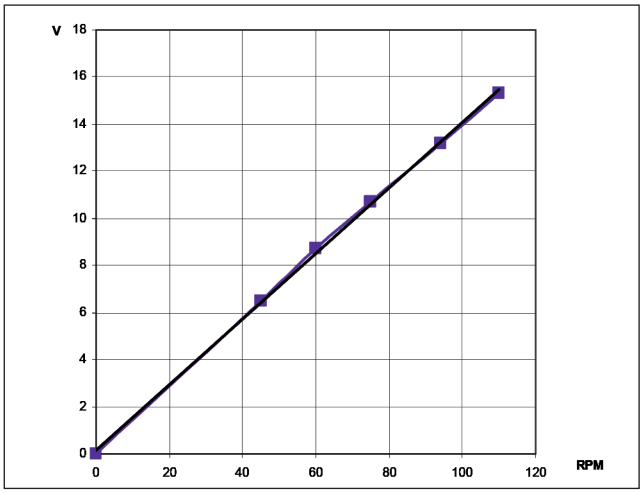


Рис. 5. Зависимость $V = f(\text{RPM})$

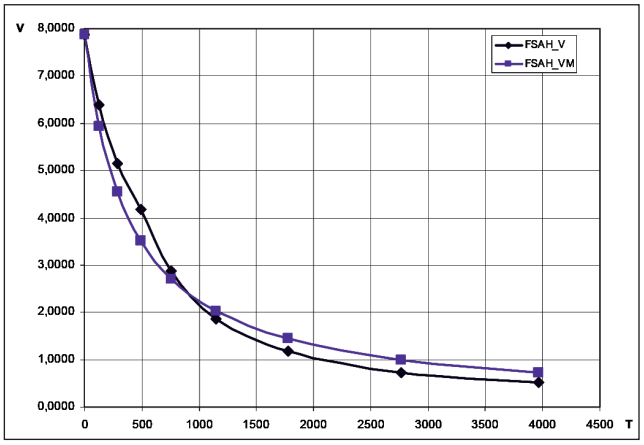


Рис. 6. Зависимость $V = f(T)$ при торможении FSAH – STOP

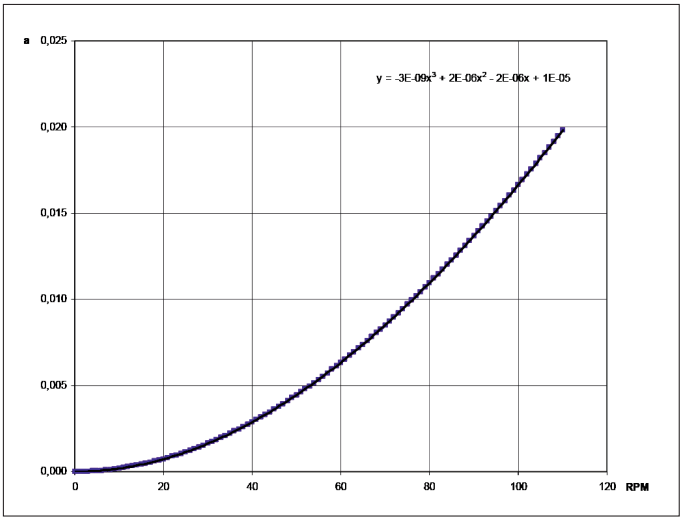


Рис. 7. Зависимость $a = f(\mathrm{RPM})$

Методика идентификации параметров модели с использованием данных из МБ состоит в следующем:

1. По данным характеристик главного двигателя (см. табл. 2) строится зависимость $V = f(\mathrm{RPM})$, которая аппроксимируется линейной функцией (рис. 5). Коэффициенты этой функции являются параметрами модели A, B.

2. По данным об элементах движения судна при торможении (см. рис. 4) строятся зависимости $V = f(T)$ по данным МБ и модели (13) с заданным значением параметра α для всех маневров торможения. Примеры таких зависимостей для маневра FSAH – STOP показаны на рис. 6.

3. Путем подбора параметра α добиваются минимизации суммы разностей между данными МБ и модельными данными для всех маневров торможения.

4. С использованием зависимостей (7) и (9) с найденными параметрами A, B и α строят зависимость ускорения разгона $a = f(RPM)$, аппроксимируя которую находим параметры A_R, B_R, C_R уравнения (8) — рис. 7.

Обсуждение (Discussion)

Следует отметить, что предложенная в работе модель является интегрирующей. Это означает, что для получения параметров движения судна в произвольный момент времени необходимо просчитывать параметры его движения от текущего состояния судна до заданного момента времени.

Данная модель выбрана достаточно простой, с минимальным количеством параметров. Это позволяет находить ее параметры с использованием данных, представленных в МБ судна, применяя представленную в статье методику, т. е. для получения параметров математической модели не нужно проводить дорогостоящих экспериментов на само́м судне или его физической модели в бассейне. При этом следует отметить достаточно низкую точность предложенной модели. В частности, модель циркуляции судна при маневре курсом удовлетворительно работает при поворотах до 180°, при дальнейшем интегрировании модельные значения элементов движения судна значительно расходятся с данными, приведенными в МБ.

Выводы (Summary)

На основе проведенного исследования можно сделать следующие выводы:

1. В работе представлен алгоритм моделирования траектории движения судна в модуле прогноза навигационной ситуации автоматической системы расхождения судов в море. Модель динамики судна строится по данным МБ.

2. Предложенная в данной работе модель динамики судна позволяет прогнозировать его движение в системах судовой автоматизации, в частности в автоматической системе расхождения судов в море.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Смоленцев С. В.* Система автоматического расхождения как элемент системы управления безэкипажным судном / С. В Смоленцев // Сборник тезисов докладов национальной научно-практической конференции «Перспективы беспилотных технологий на водном транспорте». — СПб: Изд-во ГУМРФ им. адм. С. О. Макарова, 2018. — С. 22.

2. *Вагущенко Л. Л.* Поддержка решений по расхождению с судами / Л. Л. Вагущенко, А. Л. Вагущенко. — Одесса: Феникс, 2010. — 229 с.

3. *Вагущенко Л. Л.* Системы автоматического управления движением судна / Л. Л. Вагущенко, Н. Н. Цымбал. — 3-е изд., перераб. и доп. — Одесса: Феникс, 2007. — 328 с.

4. Международные правила предупреждения столкновений судов в море 1972 г. (МППСС-72). — 5-е изд. — М.: Моркнига, 2011. — 142 с.

5. *Смоленцев С. В.* Концепция автоматизированной интеллектуальной системы расхождения судов / С. В. Смоленцев, Б. В. Афанасьев, А. Е. Филяков, Д. В. Куниц // Эксплуатация морского транспорта. — 2012. — № 4 (70). — С. 11–14.

6. *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.

7. *Позняков С. И.* Сравнение математических моделей с точки зрения коэффициентов влияния / С. И. Позняков, Ю. И. Юдин // Вестник Мурманского государственного технического университета. — 2006. — Т. 9. — № 2. — С. 241–245.

8. *Юдин Ю. И.* Маневренные характеристики судна как функции параметров его математической модели / Ю. И. Юдин, С. И. Позняков // Вестник Мурманского государственного технического университета. — 2006. — Т. 9. — № 2. — С. 234–239.

9. *Дегтярев А. Б.* Информационная поддержка моделирования динамики судна в бортовой интеллектуальной системе / А. Б. Дегтярев, М. С. Мьо // Морские интеллектуальные технологии. — 2012. — № 4 (18). — С. 34–38.

10. *Цветов М. А.* Анализ моделей движения и методов определения координат корабля / М. А. Цветов, А. Н. Васильев // Вестник Ульяновского государственного технического университета. — 2003. — № 1-2 (21-22). — С. 59–63.

11. *Sutulo S.* Mathematical models for simulation of manoeuvring performance of ships / S. Sutulo, C. Guedes Soares // Marine Technology and Engineering. — London: Taylor & Francis Group, 2011. — Pp. 661–698.

12. *Abdel-latif S.* Simulation of ship maneuvering behavior based on the modular mathematical model / S. Abdel-latif, M. Abdel-Geliel, E. E. Zakzouk // Control & Automation (MED), 2013 21st Mediterranean Conference on. — IEEE, 2013. — Pp. 94–99. DOI: 10.1109/MED.2013.6608704.

13. *Wang X. G.* System identification modelling of ship manoeuvring motion based on support vector regression / X. G. Wang, Z. J. Zou, X. R. Hou, F. Xu // Journal of Hydrodynamics. — 2015. — Vol. 27. — Is. 4. — Pp. 502–512. DOI: 10.1016/S1001-6058(15)60510-8.

14. *Смоленцев С. В.* Принципы создания упрощенной модели динамики судна по данным маневренного буклета / С.В. Смоленцев, Д.В. Исаков // Сборник тезисов докладов национальной ежегодной научно-практической конференции профессорско-преподавательского состава ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова. — СПб: Изд-во ГУМРФ им. адм. С.О. Макарова, 2017. — С. 67–70.

15. Представление на судах информации об их маневренных характеристиках. Резолюция ИМО А.601(15). — СПб: ЦНИИМФ, 2001.

16. Annex 6. Resolution MSC.137(76). Standards for ship manoeuvrability. The Maritime Safety Committee, 2002. — 6 p.

17. MSC/Circ.1053. Explanatory notes to the standards for ship manoeuvrability. — London: International Maritime Organization, 2002. — 41 p.

REFERENCES

1. Smolentsev, Sergey Victorovich. “Automatic collision avoidance system as an subsystem of unmanned vessel’s control system.” *Sbornik tezisov dokladov konferenzii “Perspektivi bespilotnih technologiy na vodnom transporte”.* SPb.: Izd-vo GUMRF im. adm. S. O. Makarova, 2018. 22.

2. Vaguchenko, L. L., and A. L.Vaguchenko. *Podderzka rechenji po rashozdeniju s sudami.* Odessa: Feniks, 2010.

3. Vaguchenko, L. L., and N. N. Tsimbal. *Systemi avtomaticheskogo upravlenija dvizeniem sudna*. Odessa: Feniks, 2007.

4. *Mezhdunarodnye pravila preduprezhdenija stolknovenij sudov v more 1972 g. (MPPSS-72).* 5th ed. M.: Morkniga, 2011.

5. 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.

6. 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.

7. Poznjakov, S. I., and J. I. Judin. "Sravnenije matematicheskich modeley s tochki zrenija koeffizientov vlijanija." *Vestnik MGTU* 9.2 (2006): 241–245.

8. Judin, J. I., and S. I. Poznjakov. "Manevrennie characteristiki sudna kak funkzii parametrov ego matematicheskoy modeli." *Vestnik MGTU* 9.2 (2006): 234–239.

9. Degtyarev, A. B., and M. S. M'o. "Informatsionnaya podderzhka modelirovaniya dinamiki sudna v bortovoi intellektual'noi sisteme." *Morskie intellektual'nye tekhnologii* 4(18) (2012): 34–38.

10. Tzvetov, M. A., and A. N. Vasiliev. "An Analysis of Moving Models and Ship Coordinate Determination Methods." *Vestnik UlGTU* 1-2(21-22) (2003): 59–63.

11. Sutulo, Serge, and C. Guedes Soares. "Mathematical models for simulation of manoeuvring performance of ships." *Marine Technology and Engineering.* London: Taylor & Francis Group, 2011: 661–698.

12. Abdel-latif, S., M. Abdel-Geliel, and E. Eldin Zakzouk. "Simulation of ship maneuvering behavior based on the modular mathematical model." *Control & Automation (MED), 2013 21st Mediterranean Conference on*. IEEE, 2013. 94–99. DOI: 10.1109/MED.2013.6608704.

13. Wang, Xue-Gang, Zao-Jian Zou, Xian-Rui Hou, and Feng Xu. "System identification modelling of ship manoeuvring motion based on ε-support vector regression." *Journal of Hydrodynamics* 27.4 (2015): 502–512. DOI: 10.1016/S1001-6058(15)60510-8.

14. Smolentsev, S. V., and D. V. Isakov. "Printsipy sozdaniya uproshchennoi modeli dinamiki sudna po dannym manevrennogo bukleta." *Sbornik tezisov dokladov natsional'noi ezhegodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii professorsko-prepodavatel'skogo sostava GUMRF imeni admirala S.O. Makarova*. SPb: Izd-vo GUMRF im. adm. S.O. Makarova, 2017. 67–70.

15. *Provision and display of manoeuvring information on board ships. IMO Resolution A.601(15).* SPb:ZNIIMF, 2001.

16. *Annex 6. Resolution MSC.137(76). Standards for ship manoeuvrability.* The Maritime Safety Committee, 2002.

17. *MSC/Circ.1053. Explanatory notes to the standards for ship manoeuvrability.* London: International Maritime Organization, 2002.

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*

Исаков Дмитрий Владимирович —
доцент
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова»
198035, Российская Федерация, Санкт-Петербург, ул. Двинская, 5/7
e-mail: *kaf _avt@gumrf.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*

Isakov, Dmitry V. —
Associate 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*

Статья поступила в редакцию 15 ноября 2018 г.
Received: November 15, 2018.

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

DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-6-1122-1131

WAYS TO INCREASE SPEED AND SAVE FUEL TANKER IN STORM CONDITIONS

A. A. Ershov, P. I. Buklis

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

The article analyzes the mechanism of reducing voyage expenses and reducing voyage time in the conditions of storm navigation at cargo and ballast crossings of tankers. As you know, the fuel costs make up the bulk of the costs for the operation of the vessel. Therefore, in matters of improving the speed and reducing fuel consumption of a modern vessel, there is a large reserve of reducing operating costs. Modern oil tankers and other liquid cargo vessels represent the most technologically advanced offshore facilities. Due to the design features and purpose for them in the first place relevant issues of improving the speed and fuel economy, especially in stormy conditions. This article proposes a method of increasing the speed and reducing fuel consumption on tankers in stormy conditions, based on the results of experiments and observations conducted on the tanker itself. This allows you to take into account the experience of operation of a particular tanker, as well as the history of changes in the parameters of its propulsion over time. In addition to the special experiments and observations that can be developed for each tanker, most of the data that can be used to solve the above-mentioned urgent problems are contained in the ship logs. The analysis of navigation and machine log information provides a broad opportunity to obtain data that can be used for each specific tanker, taking into account all the changes that accompany the life of the vessel. Timely processing and analysis of navigation and machine logs, accumulation and analysis of data on a specific vessel allows increasing the speed and ensuring fuel economy of the tanker in specific conditions of storm navigation, taking into account the previous experience of operation of the vessel. The article provides examples of the use of processed navigation and machine log information to solve the above problems. It is shown that the increase in the speed of the tanker in a storm and fuel economy can be achieved at the same angles of wind and wave. This combination of increased speed and reduced fuel consumption at the same heading provides opportunities to optimize voyage costs and reduce voyage time in stormy conditions during cargo and ballast crossings of tankers both at the stage of transition planning and in conditions of storm navigation. When improving the methods proposed in this article to improve the parameters of propulsion and fuel economy in stormy navigation, they can be extended to other types of vessels.

Keywords: increasing the speed of the tanker in a storm, reducing fuel consumption, optimization of voyage costs, reducing the voyage time.

For citation:
Ershov, Andrey A., and Peter I. Buklis. "Ways to increase speed and save fuel tanker in storm conditions." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova* 10.6 (2018): 1122–1131. DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-6-1122-1131.

УДК 655.62.052.4

СПОСОБЫ УВЕЛИЧЕНИЯ СКОРОСТИ И ЭКОНОМИИ ТОПЛИВА ТАНКЕРА ПРИ ШТОРМОВОМ ПЛАВАНИИ

А. А. Ершов, П. И. Буклис

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

В статье проанализирован механизм снижения рейсовых расходов и уменьшения рейсового времени в условиях штормового плавания при грузовых и балластных переходах танкеров. Как известно, именно затраты на топливо составляют основную часть затрат на эксплуатацию судна. Поэтому в вопросах улучшения скорости и снижения расхода топлива современного судна существует большой резерв снижения эксплуатационных расходов. Известно, что современные нефтяные танкеры и другие наливные суда представляют наиболее технологичные морские объекты. В силу особенностей конструкции и назначения для них в первую очередь актуальными являются вопросы повышения показателей скорости и экономии топлива,

особенно в условиях штормового плавания. В настоящей статье предлагается метод увеличения скорости и снижения расхода топлива на танкерах в условиях штормового плавания, основанный на результатах экспериментов и наблюдений, проведенных танкере. Это позволяет в максимальной степени учитывать особенности, опыт эксплуатации конкретного танкера, а также историю изменения параметров его ходкости с течением времени. Помимо проведения специальных экспериментов и наблюдений, которые могут быть разработаны для каждого танкера, большинство данных для решения вышеуказанных актуальных задач содержится в судовых журналах. Анализ информации навигационных и машинных журналов дает возможность получать данные, которые могут быть использованы для каждого конкретного танкера с учетом всех изменений в процессе его эксплуатации. Своевременная обработка и анализ информации навигационных и машинных журналов, накопление и анализ данных по конкретному судну позволяют увеличить скорость и обеспечить экономию топлива танкера в конкретных условиях штормового плавания, учитывая предыдущий опыт эксплуатации данного судна. В статье приводятся примеры использования обработанной информации навигационных и машинных данных для решения вышеуказанных задач. Показано, что увеличение скорости танкера в шторм и экономия топлива могут достигаться при одних и тех же курсовых углах ветра и волнения. Такое сочетание увеличения скорости и снижения расход топлива при одном и том же курсовом угле волнения дает широкие возможности для оптимизации рейсовых расходов и уменьшения времени рейса в условиях штормового плавания при грузовых и балластных переходах танкеров как на стадии планирования переходов, так и в условиях конкретного штормового плавания. При совершенствовании предлагаемых в настоящей статье методов улучшения параметров ходкости и экономии топлива при штормовом плавании они могут быть распространены и на другие типы судов.

Ключевые слова: увеличение скорости танкера в шторм, снижение расхода топлива, оптимизация рейсовых расходов, уменьшение времени рейса.

Для цитирования:
Ершов А. А. Способы увеличения скорости и экономии топлива танкера при штормовом плавании / А. А. Ершов, П. И. Буклис // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2018. — Т. 10. — № 6. — С. 1122–1131. DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-6-1122-1131.

Введение (Introduction)

В настоящее время инновационные технологии проникли практически во все сферы деятельности современного морского судна, включая навигацию, управление, расхождение с другими судами, технологии проектирования и контроля состояния корпуса, многочисленные сферы безопасности и охраны и др. Сейчас разрабатываются проекты беспилотных судов, которые будут управляться без присутствия человека. Однако в современных условиях не получили должного развития по сравнению с предыдущими периодами эксплуатации судов способы штормового плавания и, прежде всего, вопросы, касающиеся скорости и экономии топлива. К этим аспектам в первую очередь относятся вопросы скорости и экономии топлива. Как известно, именно затраты на топливо составляют основную часть затрат на эксплуатацию судна. Поэтому в вопросах улучшения скорости и снижения расхода топлива современного судна имеется большой резерв снижения эксплуатационных расходов. Современные нефтяные танкеры и другие наливные суда представляют наиболее технологичные морские объекты. В силу особенностей конструкции и назначения для них главным образом актуальны вопросы повышения показателей скорости и экономии топлива, особенно в условиях штормового плавания.

Отличительной чертой эксплуатации современных танкеров является то, что они совершают в основном только два вида перехода: в грузу и в балласте. В грузу танкер имеет небольшую парусность и большое водоизмещение. Параметры ходкости при плавании в шторм определяются сопротивлением воды движению судна и дополнительным влиянием морского волнения. Улучшение параметров ходкости и экономии топлива в этих условиях может достигаться за счет оптимизации дифферента, улучшения работы носового бульба и работы гребного винта, снижения волнового сопротивления судна, а также изменения курса судна для улучшения курсового угла волнения в условиях шторма. Ветер может оказывать лишь косвенное влияние на улучшение параметров ходкости, так как судно обладает небольшой парусностью и отсутствием палубного груза.

В условиях балластного перехода танкер обладает значительной парусностью, небольшой осадкой, в связи с чем он в большей степени подвержен влиянию ветра и дополнительным опасностям, связанным со штормовым плаванием: слемингу, слепингу, оголению и «разгону» винта. Улучшение параметров ходкости в условиях балластных переходов танкеров может достигаться за счет улучшения курсового угла ветра, которое будет снижать сопротивление ветра движению судна и одновременно может решать задачи ликвидации возможности слеминга и слепинга, оптимизации дифферента для снижения лобовой парусности судна, ликвидации возможности «разгона» гребного винта, а также другие задачи. Дополнительно в условиях балластных переходов можно более эффективно решать задачи оптимизации дифферента для улучшения скорости и снижения расхода топлива танкера.

Вопросам улучшения параметров ходкости и экономии топлива при штормовом плавании посвящено много научных исследований [1], [2]. Существенным недостатком указанных в данных работах методов улучшения параметров ходкости и экономии топлива при штормовом плавании является то, что большинство исследований в этой области были проведены достаточно давно для типов судов, которые сейчас уже практически не эксплуатируются. Это делает предлагаемые в них расчетные методы и рекомендации практически непригодными для современных судов.

Ряд работ посвящен вопросам одновременного решения проблем безопасности и увеличения скорости судна при штормовом плавании [3]–[5]. В работе [6] рассмотрен вопрос улучшения параметров ходкости танкера при балластных переходах при помощи паспортных диаграмм. В работах [7]–[10] рассматривались расчетные методы определения параметров качки и воздействия морского волнения на движение судна, а также улучшения пропульсивных качеств судна. В работах [11]–[14] предлагаются информационно-аналитические и навигационно-гидрографические методы прогнозирования потоков судов и скорости их движения в определенных районах Мирового океана.

В данной статье предлагается метод улучшения параметров скорости и снижения расхода топлива, основанный на данных экспериментов и наблюдений, проведенных непосредственно на танкере, что позволяет в максимальной степени учесть особенности и опыт эксплуатации конкретного танкера, а также историю изменения параметров его ходкости с течением времени. Помимо проведения специальных экспериментов и наблюдений, которые могут быть разработаны для каждого танкера, большинство данных, которые могут быть использованы для решения вышеуказанных задач, содержатся в судовых журналах.

Анализ данных судовых навигационных и машинных журналов позволяет предоставить информацию, которая может быть использована для каждого конкретного танкера с учетом всех изменений, которые сопровождают его на протяжении всего периода эксплуатации. Своевременная обработка этой информации, накопление и анализ данных по конкретному судну позволяют максимально улучшить параметры скорости, обеспечить экономию топлива конкретного танкера, учитывая предыдущий опыт эксплуатации данного судна. При совершенствовании предлагаемых в настоящей статье методов улучшения параметров ходкости и экономии топлива при штормовом плавании они могут быть распространены и на другие типы судов.

Методы и материалы (Methods and Materials)

Танкеры, включая крупнотоннажные типа «Афрамакс» или «Панамакс», совершающие грузовые и балластные переходы, зачастую подвергаются воздействию окружающей среды, особенно в условиях штормового плавания. В этих условиях параметры ходкости судна ухудшаются в максимальной степени. Также увеличивается и расход топлива судна, который составляет наибольшую часть судовых затрат крупнотоннажных танкеров. В условиях полной загрузки или балластного перехода каждая вахта движения судна фиксируется в судовом навигационном и машинном журналах. В судовом навигационном журнале отображаются характеристики и направление морского волнения, истинная и кажущаяся скорость ветра, курс и скорость судна, в машинном журнале фиксируется частота вращения гребного винта и расход топлива за сутки, а также дру-

гие данные. Эта информация может быть использована для обработки и дальнейшего использования с целью улучшения параметров скорости и экономии топлива танкера. Например, для увеличения скорости движения танкера в условиях штормового плавания может быть проанализирована история штормового плавания данного судна в условиях балластного перехода или в полном грузу, а также в условиях определенного ветра и высоты волны. Анализу может быть подвергнута скорость движения судна в условиях определенного курсового угла ветра и курсового угла волны с использованием данных, зафиксированных ранее в судовых журналах при аналогичных вариантах загрузки судна и других, близких к данному рейсу, дополнительных параметрах состояния танкера (например, срок от последней постановки в док, состояние корпуса, покраска, шероховатость, сезон и район плавания и др.). Все эти данные могут быть систематизированы на основании данных судовых журналов и использованы для решения вышеуказанных задач.

В качестве примера решения задачи увеличения скорости движения танкера в балласте в условиях штормового плавания может быть использована диаграмма (рис. 1), на которой представлены обработанные ранее данные предыдущих балластных переходов этого танкера в условиях аналогичной загрузки, состояния судна и параметров шторма.

При оценке воздействия ветра на судно, движущееся со скоростью, судоводители обычно используют кажущуюся скорость ветра $v_к$ в системе координат, связанной с судном:

$$v_к = \sqrt{v_и^2 + v^2 + 2vv_и \sin КУ}, \quad (1)$$

где $v_и$ — истинная скорость ветра, м/с; v — скорость судна, м/с; $КУ_{ветра}$ — курсовой угол ветра, град.

Диаграмма, представленная на этом рисунке, содержит информацию в зависимости от истинной скорости ветра $v_и$, что дает большие возможности ее использования как на стадии прогнозирования скорости перехода при получении долговременного прогноза погоды, так и на стадии выбора курса и скорости в условиях конкретного штормового плавания на данном танкере.

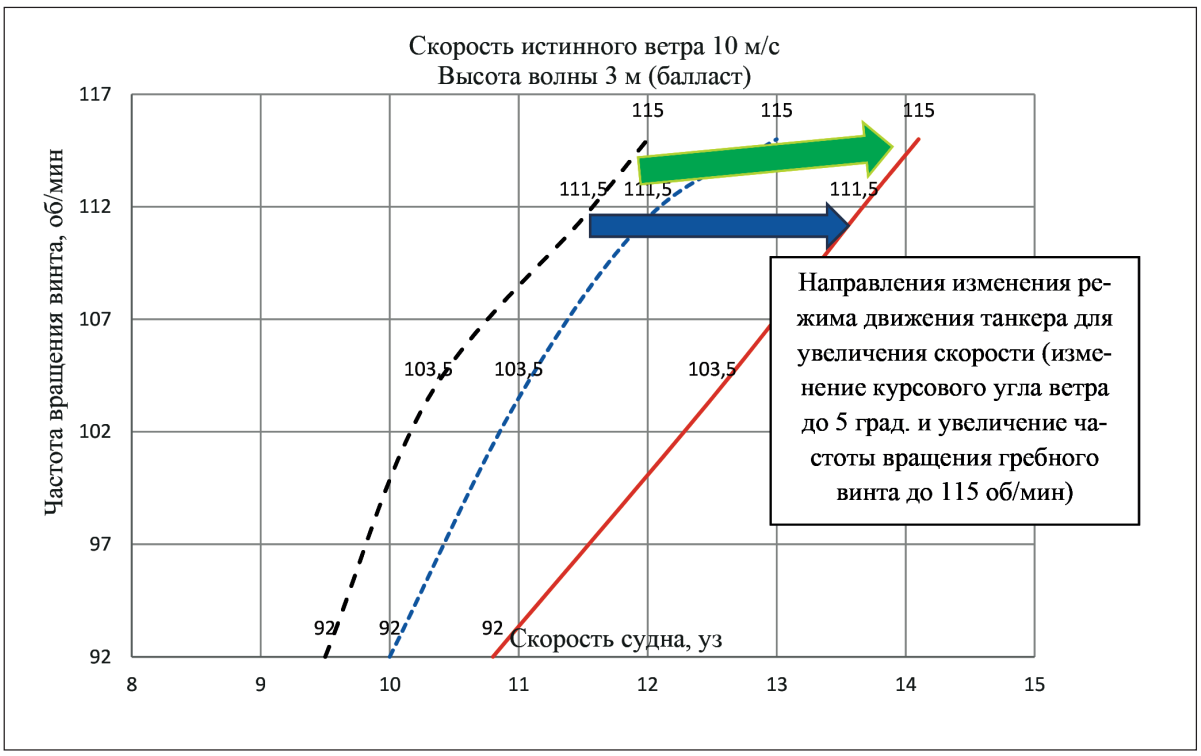


Рис. 1. Использование диаграммы данных предыдущих рейсов на основе обработки информации судовых журналов для увеличения скорости танкера в условиях балластного перехода

Условные обозначения:

- - - - - — $КУ_{ветра} = 15$ $КУ_{волн} = 8$;
- - - - - — $КУ_{ветра} = 5$ $КУ_{волн} = 5$;
——— — $КУ_{ветра} = 25$ $КУ_{волн} = 25$

В случае, рассмотренном на рис. 1, для увеличения скорости движения судна требуется изменение курса судна таким образом, чтобы курсовой угол ветра ($КУ_{ветра}$ на рис. 1) был равен 5 град., а также возможно было увеличение частоты вращения гребного винта в следующих пределах: 111,5–115 об/мин. Как отмечалось ранее, поскольку танкер совершает балластный переход с большой парусностью и при небольших значениях высоты волны, для увеличения его скорости движения судоводителю при изменениях курса судна следует ориентироваться на данные курсовых углов ветра. Эти данные могут быть получены на основе известных научных исследований [1]–[4], а также по наблюдениям, осуществляемым на самом танкере.

В случае, если танкер совершает переход в грузу, то для решения задачи увеличения скорости может быть использована диаграмма, которая представлена на рис. 2, основанная на обработке судовых и машинных журналов с данными истории грузовых переходов данного танкера. Поскольку танкер осуществляет переход в грузу с большой осадкой, водоизмещением и малой площадью парусности, подвергаемой воздействию ветра, основное снижение скорости, прежде всего, происходит за счет дополнительного влияния морского волнения при плавании в шторм. Улучшение параметров скорости в этих условиях может достигаться за счет изменения курса судна для улучшения курсового угла волнения в условиях шторма. Ветер может оказывать лишь косвенное влияние на улучшение параметров ходкости, так как судно обладает небольшой парусностью и отсутствием дополнительного палубного груза.

Как следует из источника [2], наибольшее влияние на снижение скорости оказывает дополнительное влияние морского волнения при курсовом угле волнения 45–60 град. Поэтому основные действия для улучшения скорости судна заключается в изменении курсового угла волнения с 45 град. до 8 град. и также, возможно, увеличении частоты вращения гребного винта до значений 111,5–115 об/мин.

Направления изменения режима движения танкера для увеличения скорости (изменение курсового угла ветра до 5 град. и увеличение частоты вращения гребного винта до 115 об/мин))

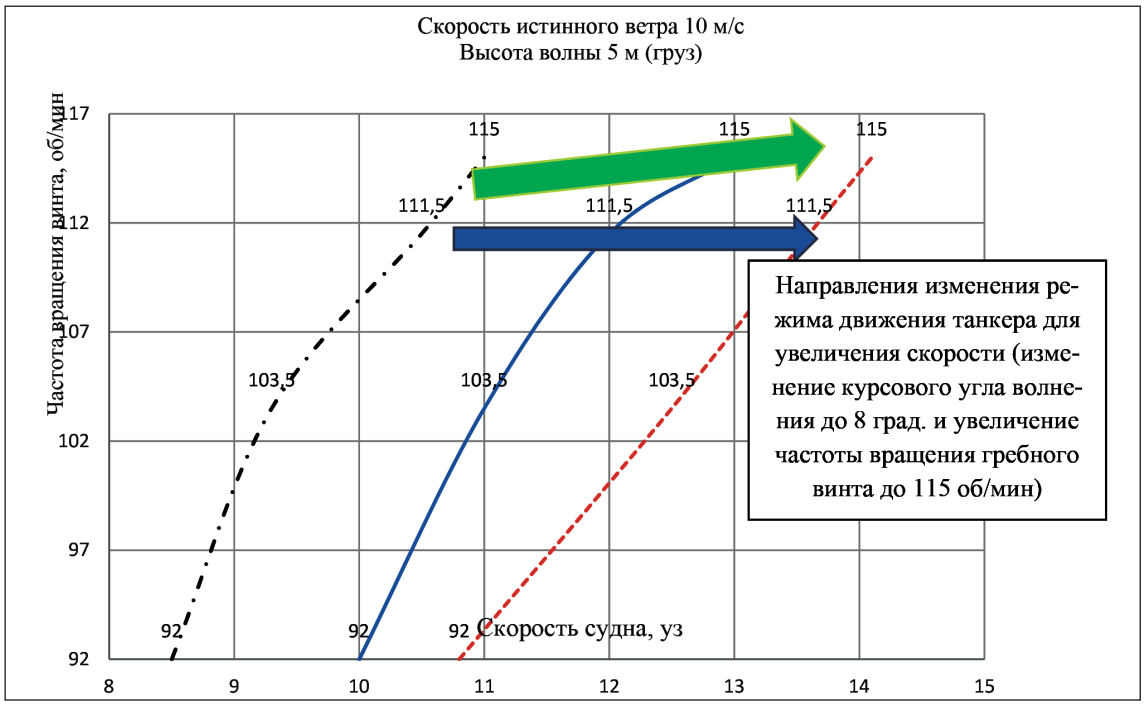


Рис. 2. Использование диаграммы данных предыдущих рейсов на основе обработки информации судовых журналов для увеличения скорости судна в условиях перехода танкера в грузу

Условные обозначения:

– · – · – — $КУ_{ветра}$ = 15 $КУ_{волн}$ = 25;

——— — $КУ_{ветра}$ = 5 $КУ_{волн}$ = 8;

– – – – — $КУ_{ветра}$ = 25 $КУ_{волн}$ = 45

Если перед компанией и судоводителями данного судна ставится задача снижения расхода топлива при штормовом плавании танкера в условиях балластного перехода, то можно воспользоваться данными диаграммы на рис. 3, основанной на обработке судовых навигационных и машинных журналов, содержащих не только данные о волнении, но и параметры расхода топлива судна в предыдущих аналогичных рейсах. В данном случае для уменьшения расхода топлива судна требуется изменение курса судна таким образом, чтобы курсовой угол ветра ($КУ_{ветра}$) стал равным 5 град., а также было возможно уменьшение частоты вращения гребного винта до значений 111,5–103,5 об/мин.

Как отмечалось ранее, поскольку танкер совершает балластный переход с большой парусностью и небольших значениях высоты волны, для уменьшения его расхода топлива судоводителю при изменениях курса судна следует ориентироваться на данные курсовых углов ветра. При выборе курсового угла ветра следует также руководствоваться необходимостью избежания возможности появления слеминга и слепинга, возможности «разгона» гребного винта и других задач. Видно, что в данном случае изменение курсового угла ветра до 5 град. приводит к увеличению скорости данного танкера (см. рис. 1) с уменьшением его расхода топлива (рис. 3), что обусловлено снижением основных составляющих сопротивления движению танкера и улучшением параметров ходкости данного судна. Это дает компаниям и судовладельцам широкие возможности для оптимизации рейсовых расходов и уменьшения рейсового времени в условиях штормового плавания при грузовых и балластных переходах танкеров.



Рис. 3. Использование диаграммы данных предыдущих рейсов на основе обработки информации судовых навигационных и машинных журналов для уменьшения расхода топлива судна в условиях балластного перехода танкера

Условные обозначения:

- - - - - - — $КУ_{ветра} = 15$;

——— — $КУ_{волн} = 15$;

–·–·–·– — $КУ_{ветра} = 5$ $КУ_{волн} = 8$

В случае, если танкер совершает переход в грузу, то для решения задачи снижения расхода топлива может быть использована диаграмма, представленная на рис. 4, которая основана на обработке судовых и машинных журналов с историей переходов данного танкера в грузу в сходных с данным рейсом условиях и аналогичным состоянием корпуса судна

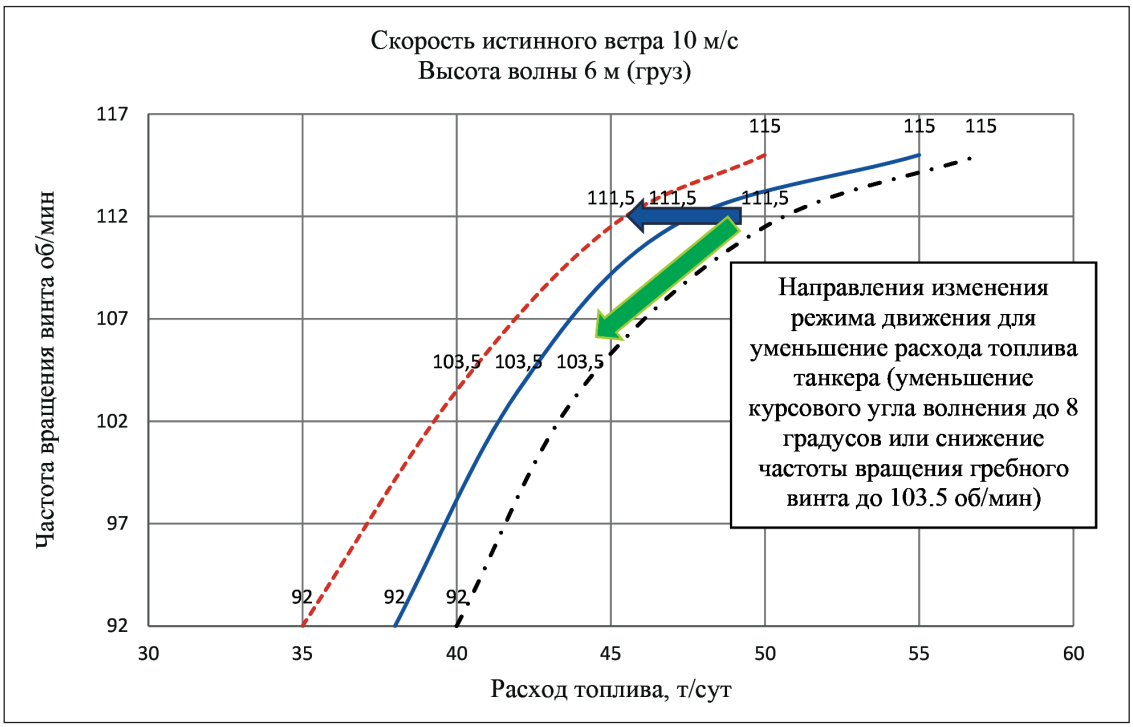


Рис. 4. Использование диаграммы данных предыдущих рейсов на основе обработки информации судовых навигационных и машинных журналов для уменьшения расхода топлива танкера в условиях грузового перехода

Условные обозначения:

– – – — $КУ_{ветра} = 15$ $КУ_{волн} = 25$;

——— — $КУ_{волн} = 5$ $КУ_{волн} = 8$;

–·–·– — $КУ_{ветра} = 25$ $КУ_{волн} = 45$.

Поскольку танкер осуществляет переход в грузу с большой осадкой и водоизмещением, малой площадью парусности, подверженной воздействию ветра, основное повышение расхода топлива происходит за счет сопротивления воды движению танкера и дополнительного влияния морского волнения при плавании в шторм. Снижение расхода топлива танкера может достигаться, прежде всего, за счет изменения курса судна для улучшения курсового угла волнения в условиях шторма.

Как видно, что в рассмотренном ранее случае изменение курсового угла волнения до 8 град. приводит к увеличению скорости данного танкера (см. рис. 2) вместе с одновременным уменьшением его расхода топлива (см. рис. 4). Это обусловлено снижением основных составляющих сопротивления движению танкера и улучшением параметров ходкости данного судна.

Такое сочетание увеличение скорости и снижение расхода топлива при одном и том же курсовом угле волнения дает широкие возможности для оптимизации рейсовых расходов и уменьшения времени рейса в условиях штормового плавания при грузовых и балластных переходах танкеров как на стадии планирования переходов, так и в условиях конкретного штормового плавания.

Результаты (Results)

В настоящей статье предлагается метод увеличения скорости и снижения расхода топлива на танкерах в условиях штормового плавания, основанный на результатах экспериментов и наблюдений, проведенных непосредственно на танкере. Это позволяет в максимальной степени учитывать особенности, опыт эксплуатации конкретного танкера, а также историю изменения параметров его ходкости с течением времени. Помимо проведения специальных экспериментов и наблюдений, которые могут быть разработаны для каждого танкера, большинство данных для решения вышеуказанных задач содержатся в судовых журналах.

Анализ информации навигационных и машинных журналов дает широкую возможность получать данные, которые могут быть использованы для каждого конкретного танкера с учетом всех изменений, которые сопровождают жизнь судна. Своевременная обработка и анализ информации судовых и машинных журналов, а также накопление и анализ данных по конкретному судну позволяют увеличивать скорость и обеспечивать экономию топлива танкера в конкретных условиях штормового плавания, учитывая предыдущий опыт эксплуатации данного судна.

При совершенствовании предлагаемых в настоящей статье методов увеличения скорости и экономии топлива при штормовом плавании они могут быть распространены и на другие типы судов.

Обсуждение (Discussion)

Несмотря на развитие современных технологий и проникновение их практически во все сферы деятельности современного морского судна, включая навигацию, управление, расхождение с другими судами, технологии проектирования и контроля состояния корпуса, многочисленные сферы безопасности и охраны и т. п., способы штормового плавания в современных условиях не получили должного развития. К актуальным аспектам штормового плавания, прежде всего, относятся вопросы увеличения скорости судна и экономии топлива при плавании в шторм. Затраты на топливо составляют основную часть затрат на эксплуатацию судна в рейсе. Поэтому в вопросах улучшения скорости и снижения расхода топлива современного судна в условиях шторма существует большой резерв снижения эксплуатационных расходов. Современные нефтяные танкеры и другие наливные суда представляют наиболее технологичные морские объекты. Для них, в силу особенностей конструкции и назначения, в первую очередь актуальны вопросы повышения показателей скорости и экономии топлива, особенно в условиях штормового плавания.

В работах [1], [2], [7]–[10] рассматривались вопросы улучшения показателей ходкости и улучшения эксплуатационных показателей судна в условиях штормового плавания, а также совершенствования пропульсивных качеств судна. Существенным недостатком большинства указанных методов улучшения параметров ходкости и экономии топлива при штормовом плавании является то, что большинство исследований в этой области были выполнены достаточно давно и они проводились для типов судов, которые сейчас уже практически не эксплуатируются. Это делает предлагаемые расчетные методы и рекомендации, разработанные для судов тех типов, практически непригодными для современных судов. Однако они могут быть использованы для предварительного анализа факторов, оказывающих влияние на скорость и экономию топлива судна при плавании в шторм, и обоснования необходимых экспериментов и наблюдений, которые должны быть проведены на конкретном современном судне.

Полученные в настоящей статье выводы совпадают с данными других авторов о возможности совершенствования способов штормового плавания, включая увеличение скорости и экономии топлива судна в условиях штормового плавания. Результаты настоящей работы могут быть использованы для развития методов увеличения скорости и экономии топлива при плавании в шторм с учетом особенностей и истории эксплуатации конкретного судна.

Выводы

1. Предлагаемый в настоящей статье способ, основанный на результатах экспериментов и наблюдений, проведенных непосредственно на танкере, позволяет решать вопросы увеличения скорости и экономии топлива при штормовом плавании. Он дает возможность в максимальной степени учитывать особенности, опыт эксплуатации конкретного танкера, а также историю изменения параметров его ходкости с течением времени.

2. Имеющиеся данные проведенных ранее научных исследований могут быть использованы для предварительного анализа факторов, влияющих на скорость и экономию топлива судна при плавании в шторм и обоснования необходимых экспериментов и наблюдений, которые должны быть проведены на конкретном современном судне.

3. Анализ информации судовых и машинных журналов дает широкую возможность получения данных, которые могут быть использованы для каждого конкретного танкера с учетом всех изменений, сопровождающих судно в течение всего периода его эксплуатации. Своевременная обработка и анализ информации судовых и машинных журналов, а также накопление и анализ данных по конкретному судну позволяют увеличивать скорость и обеспечить экономию топлива танкера в конкретных условиях штормового плавания, учитывая предыдущий опыт эксплуатации данного судна.

4. При совершенствовании предлагаемых в настоящей статье методов улучшения параметров ходкости и экономии топлива при штормовом плавании они могут быть распространены и на другие типы судов.

5. Результаты настоящей статьи дают широкие возможности для оптимизации рейсовых расходов и уменьшения времени рейса в условиях штормового плавания при грузовых и балластных переходах танкеров как на стадии планирования переходов, так и в условиях штормового плавания.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Справочник капитана дальнего плавания / Л. Р. Аксютин [и др.]; под. ред. Г. Г. Ермолаева. — М. Транспорт, 1988. — 248 с.

2. *Липис В. Б.* Безопасные режимы штормового плавания: справ.-практ. пособие / В. Б. Липис, Ю. В. Ремез. — М.: Транспорт, 1982. — 117 с.

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

4. *Ершов А. А.* Безопасность штормового плавания судна / А. А. Ершов, А. В. Теренчук // Научно- технический вестник Поволжья. — 2015. — № 3. — С. 129–131.

5. *Ершов А.А.* Способы автоматизации штормового плавания судна / А. А. Ершов, А. В. Теренчук // Научно-технический вестник Поволжья. — 2015. — № 4. — С. 62–64.

6. *Буклис П. И.* Методы снижения сопротивления движению танкера при балластных переходах / П. И. Буклис // Материалы IX Межвузовской научно-практической конференции аспирантов, студентов и курсантов «Современные тенденции и перспективы развития водного транспорта России» 23 мая 2018 года. — СПб.: Изд-во ГУМРФ им. адм. С. О. Макарова, 2018. — С. 19–22.

7. *Kato H.* Approximate methods of calculating the period of roll of ships / H. Kato // Journal of Zosen Kiokai. — 1956. — Vol. 1956. — No. 89. — Pp. 59–64. DOI: 10.2534/jjasnaoe1952.1956.89_59.

8. *Newman J. N.* The exciting forces on a moving body in waves / J. N. Newman // Journal of Ship Research. — 1965. — Vol. 9. — No. 3. — Pp. 190–199.

9. Libas — revolutionary purse seine netter // Fishing news international. — August 2004. — Vol. 43. — № 8.

10. *Levander O.* New concept in Ferry Propulsion / O. Levander // Scandinavian Shipping Gazette. — September, 28, 2009.

11. *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.

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

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

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

REFERENCES

1. Aksyutin, L.R., V.M. Bondar', G.G. Ermolaev, et al. *Spravochnik kapitana dal'nego plavaniya*. Edited by G.G. Ermolaev. M. Transport, 1988.

2. Lipis, V.B., and Yu.V. Remez. *Bezopasnye rezhimy shtormovogo plavaniya: spravochno-prakticheskoe posobie*. M.: Transport, 1982.

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

4. Ershov, A.A., and A.V. Terenchuk. "Safety of storm navigation of the vessels." *Scientific and Technical Volga region Bulletin* 3 (2015): 129–131.

5. Ershov, A.A., and A.V. Terenchuk. "Ways to automate storm navigation of the vessel." *Scientific and Technical Volga region Bulletin* 4 (2015): 62–64.

6. Buklis, P.I. "Metody snizheniya soprotivleniya dvizheniyu tankera pri ballastnykh perekhodakh." *Materialy IX mezhvuzovskoi nauchno-prakticheskoi konferentsii aspirantov, studentov i kursantov «Sovremennye ten-dentsii i perspektivy razvitiya vodnogo transporta Rossii» 23 maya 2018 goda*. SPb.: Izd-vo GUMRF im. adm. S.O. Makarova, 2018. 19–22.

7. Kato, Hiroshi. "Approximate methods of calculating the period of roll of ships." *Journal of Zosen Kiokai* 1956.89 (1956): 59–64. DOI: 10.2534/jjasnaoe1952.1956.89_59.

8. Newman, J. N. "The exciting forces on a moving body in waves." *Journal of Ship Research* 9.3 (1965): 190–199.

9. "Libas – revolutionary purse seine netter." *Fishing news international* 43.8 (2004).

10. Levander, O. "New concept in Ferry Propulsion." *Scandinavian Shipping Gazette* September, 28, 2009.

11. 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.

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

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

14. Eguíluz ,V.M., J. Fernández-Gracia, X. Irigoien, and C.M. Duarte. "A quantitative assessment of Arctic shipping in 2010-2014." *Scientific reports* 6 (2016): 30682. DOI: 10.1038/srep30682.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Ершов Андрей Александрович —
доктор технических наук, доцент
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала
С. О. Макарова»
198035, Российская Федерация, Санкт-Петербург,
ул. Двинская, 5/7
e-mail: *ershov_63@mail.ru*, *kaf_mus@gumrf.ru*
Буклис Петр Игоревич — аспирант
Научный руководитель:
Развозов Сергей Юрьевич
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала
С. О. Макарова»
198035, Российская Федерация, Санкт-Петербург,
ул. Двинская, 5/7
e-mail: *petyunyaaa@mail.ru*

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Ershov, Andrey A. —
Dr. of Technical Sciences, associate professor
Admiral Makarov State University of Maritime
and Inland Shipping
5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg 198035,
Russian Federation
e-mail: *ershov_63@mail.ru*, *kaf_mus@gumrf.ru*
Buklis, Peter I. — Postgraduate
Supervisor:
Razvozov, Sergey Yu.
Admiral Makarov State University of Maritime
and Inland Shipping
5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg 198035,
Russian Federation
e-mail: *petyunyaaa@mail.ru*

Статья поступила в редакцию 19 сентября 2018 г.
Received: September 19, 2018.

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

DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-6-1132-1142

A COMPREHENSIVE ASSESSMENT OF THE SAFETY OF NAVIGATION IN THE WATER AREA OF THE NORTHERN SEA ROUTE

A. B. Afonin

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

The article is devoted to the development of a model of navigational conditions of the water area. The main features of the water area of the Northern sea route are given. The main factors that determine the navigation conditions of the Northern sea route are highlighted. The uniqueness of its navigation conditions in comparison with the navigation conditions of the vast majority of coastal areas of the world ocean is emphasized. Define artificial and natural factors that shape the conditions of navigation in the water area. Among the natural factors are hydrographic and hydrometeorological, which have a major impact on the formation of navigation conditions. It is assumed that it is possible to expand the composition of factors in order to describe in more detail the navigational conditions of the water area. The generalized representation of the model of navigation conditions as a vector in the n-dimensional Euclidean space is substantiated. The coordinate axes of the n-dimensional coordinate system are the factors that form the navigation conditions of the water area. It is proposed to consider the numerical values of the factors forming the navigational conditions of the water area as the coordinates of the n - dimensional vector of the state of the water area in the n-dimensional Euclidean vector space. The ship state model is also proposed to be interpreted as a vector in the n-dimensional Euclidean space. The coordinates of this vector are the parameters of the vessel, describing its ability to withstand the negative effects of navigational conditions of the water area. A method for determining the coordinates is proposed. The measure of safety of navigation of the vessel on the water area is offered to consider a mutual arrangement of these vectors. The necessity of normalization of vectors of the state of navigational conditions of the water area and the state of the vessel for a quantitative assessment of safety measures of navigation of the vessel is proved. An expression that can be interpreted as a numerical measure of safety of navigation of a given vessel in a given water area is obtained. The formula by which the measure of safety of navigation takes numerical value is deduced.

Keywords: Northern sea route, safety of navigation, navigational conditions of the water area, hydrographic water reserve under the keel, hydrographic conditions of the water area, hydro meteorological conditions of the water area.

For citation:
Afonin, Andrej B. "A comprehensive assessment of the safety of navigation in the water area of the Northern sea route." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova* 10.6 (2018): 1132–1142. DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-6-1132-1142.

УДК 528.47

КОМПЛЕКСНАЯ ОЦЕНКА БЕЗОПАСНОСТИ ПЛАВАНИЯ В АКВАТОРИИ СЕВЕРНОГО МОРСКОГО ПУТИ

А. Б. Афонин

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

Статья посвящена разработке модели навигационных условий акватории. Приводятся основные особенности акватории Северного морского пути. Выделяются основные факторы, определяющие навигационные условия акватории Северного морского пути. Подчеркивается уникальность ее навигационных условий по сравнению с навигационными условиями подавляющего большинства прибрежных районов Мирового океана. Определяются искусственные и естественные факторы, формирующие навигационные условия акватории. Среди естественных факторов выделяются гидрографические и гидрометеорологические, оказывающие основное влияние на формирование навигационных условий. Предполагается возможность расширения состава факторов с целью более подробного описания навигационных условий аквато-

рии. Обосновывается обобщенное представление модели навигационных условий как вектора в n-мерном евклидовом пространстве. Координатными осями n-мерной системы координат выступают факторы, формирующие навигационные условия акватории. Предложено численные значения факторов, формирующих навигационные условия акватории, рассматривать как координаты n-мерного вектора состояния акватории в n-мерном евклидовом векторном пространстве. Модель состояния судна также предлагается интерпретировать как вектор в n-мерном евклидовом пространстве. Координатами этого вектора служат параметры судна, описывающие его способность противостоять негативным влияниям навигационных условий акватории. Предложен метод определения координат. Мерой безопасности плавания судна по акватории предлагается считать взаимное расположение этих векторов. Обоснована необходимость нормирования вектора состояния навигационных условий акватории и вектора состояния судна. Получено выражение, которое можно интерпретировать как количественную оценку безопасности плавания заданного судна в заданной акватории. Выведена формула, с помощью которой мера безопасности плавания принимает численное значение.

Ключевые слова: Северный морской путь, безопасность плавания, навигационные условия акватории, запас под килем, гидрографические условия акватории, гидрометеорологические условия акватории.

Для цитирования:
Афонин А. Б. Комплексная оценка безопасности плавания в акватории Северного морского пути / А. Б. Афонин // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2018. — Т. 10. — № 6. — С. 1132–1142. DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-6-1132-1142.

Введение (Introduction)

Перед Российской Федерацией стоит глобальная задача превращения Северного морского пути (СМП) в постоянно действующую круглогодичную транспортную магистраль, связывающую по кратчайшему расстоянию Атлантический и Тихий океан [1]. В ближайшем будущем в акватории СМП ожидается рост интенсивности судоходства и продление сроков навигации, вплоть до превращения его в круглогодично действующую транспортную магистраль. Для обеспечения этих процессов планируется строительство ледоколов нового поколения [2]. Реализация этих планов неизбежно вызовет необходимость плавания судов в акватории СМП не только по рекомендованным маршрутам, но и с существенными отклонениями от них. Это связано с увеличением осадки судов до 12–15 м, для которых использование значительной части нынешних рекомендованных трасс затруднительно или невозможно [3]–[7].

Еще одной причиной отклонения от рекомендованных путей является наличие изменяющихся во времени и перемещающихся в пространстве ледяных полей, которые перекрывают значительную часть акватории СМП, отдельные проливы и узкости. Влияние этого фактора в течение года изменяется. Минимум влияния наступает в период летне-осенней навигации в западном секторе Арктики, максимум — в период зимне-весенней навигации в ее центральном и восточном секторе. Таким образом, явно прослеживается тенденция перехода от безопасного судоходства по рекомендованным путям к безопасному плаванию в акватории.

Безопасность плавания судна в акватории обеспечивается наличием квалифицированного экипажа и соответствием параметров судна навигационным условиям акватории. В настоящей статье принимается, что квалификация экипажа соответствует предъявляемым требованиям и не является причиной негативного влияния на безопасность плавания. Поэтому влияние человеческого фактора на безопасность здесь не рассматривается.

Параметры судна определяются его конструкцией. Их можно считать постоянными с момента постройки и до официального признания судна как не соответствующего требованиям. В данном случае под параметрами судна будем понимать только те, которые непосредственно характеризуют способность судна противостоять негативному воздействию навигационных условий.

Навигационные условия акватории формируют искусственные и естественные факторы. К *искусственным факторам* можно отнести инфраструктуру обеспечения навигации: системы определения места судна, средства навигационного оборудования, средства и системы связи

и оповещения, организацию спасательных служб. Наличие и влияние искусственных факторов на безопасность мореплавания также можно считать известными и постоянными, и на этом основании в данной работе не рассматривать. *Естественные факторы*, обусловленные природными силами, формируют навигационные условия акватории, которые изменяются как во времени, так и в пространстве.

Различные аспекты естественных навигационных условий СМП рассматривались многими авторами. Гидрографические условия безопасности плавания, зависящие от дискретности измерений глубин при гидрографической съемке рельефа дна, достаточно подробно были рассмотрены в трудах [8]–[12]. Исследованию ледовых условий посвящены работы [13]–[16]. Условия, являющиеся следствием стесненности акватории, рассматривались в исследованиях [17], [18]. В указанных работах, как правило, анализировалось влияние лишь одного фактора на создание навигационных условий, и формировался лишь один их аспект. В действительности, навигационные условия акватории формируются под воздействием не одной, а целого ряда причин: рельеф дна обусловливает стесненность судна своей осадкой; ледовые условия ограничивают маневренность судна; гидрометеорологические факторы приводят к уменьшению скорости судна вплоть до необходимости поиска укрытия и прекращения движения по заданному маршруту. Поэтому оценка безопасности плавания судна в акватории должна учитывать влияние всех значимых факторов, формирующих навигационные условия, и иметь комплексный характер.

Таким образом, решение глобальной задачи превращения СМП в круглогодичную магистраль с постоянным и достаточно плотным транспортным потоком требует разработки модели навигационных условий акватории, учитывающей совместное влияние основных факторов, оказывающих влияние на формирование этих условий, а также методики комплексной оценки безопасности плавания заданного судна. Полученные оценки дадут возможность районировать акваторию СМП в целом по условиям безопасной навигации для различных типов судов и в разное время года. Выделенные районы могут явиться основой для совершенствования существующих и проектирования новых трасс, планирования гидрографических работ, а также оценки предельных возможностей СМП как транспортной магистрали. Акватория СМП уникальна и не имеет аналогов в мире как по своим гидрографическим, так и по гидрометеорологическим условиям.

Гидрографические условия СМП формируют главным образом два фактора, рассмотренные далее. Первый фактор — обширное мелководье. Площадь арктических морей составляет около 3 млн км^2 [2]. В целом по СМП глубины до 30 м занимают 45 % площади акватории (1,4 млн км^2), а в восточном секторе — 55 % (1,2 млн км^2). Распределение глубин по площадям арктических морей приведено в табл. 1 [2], из которой следует, что наиболее мелководным является Восточно-Сибирское море, где доля глубин, не превышающих 30 м, составляет 86,5 %. Кроме мелководья, для акватории СМП характерным является наличие многочисленных банок и мелей, которые встречаются на значительном удалении от берега (рис. 1–3).

Таблица 1

Распределение глубин по площади арктических морей

Диапазон глубин, м	Доля площади, %			
	Карское море	Море Лаптевых	Восточно-Сибирское море	Чукотское море
0–10	3,5	11,1	14	1
10–20	5,3	37,4	47	
20–30	10,1	22,7	25,5	6
> 30	81,1	28,8	13,5	93

На рис. 1 показан фрагмент трассы СМП. Трасса, обозначенная красной пунктирной линией, проходит через мелководный район с глубинами 15–16 м, имеющий отличительную глубину 14,8 м.

Глубина 14,8 м не является опасной для судов с осадкой 5–6 м. Для судов с осадкой 12–15 м этот участок трассы вообще недопустим для плавания. Удаление этого участка трассы от берега — 71 морская миля.

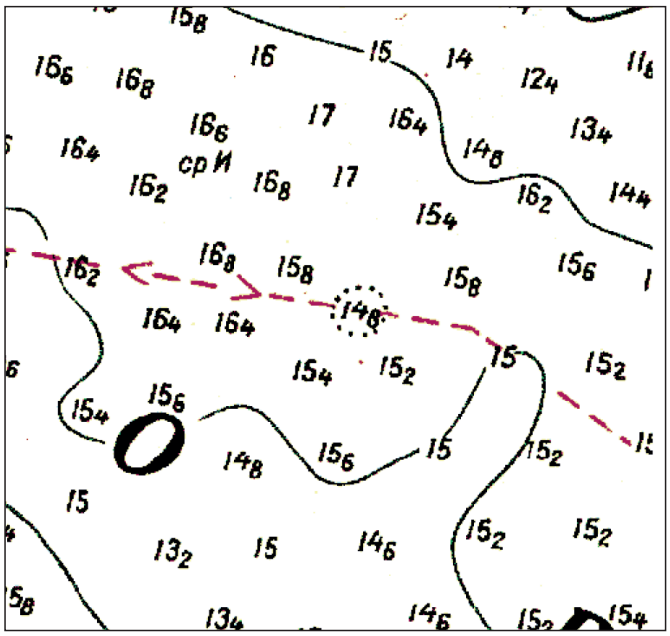


Рис. 1. Фрагмент трассы СМП в Восточно-Сибирском море

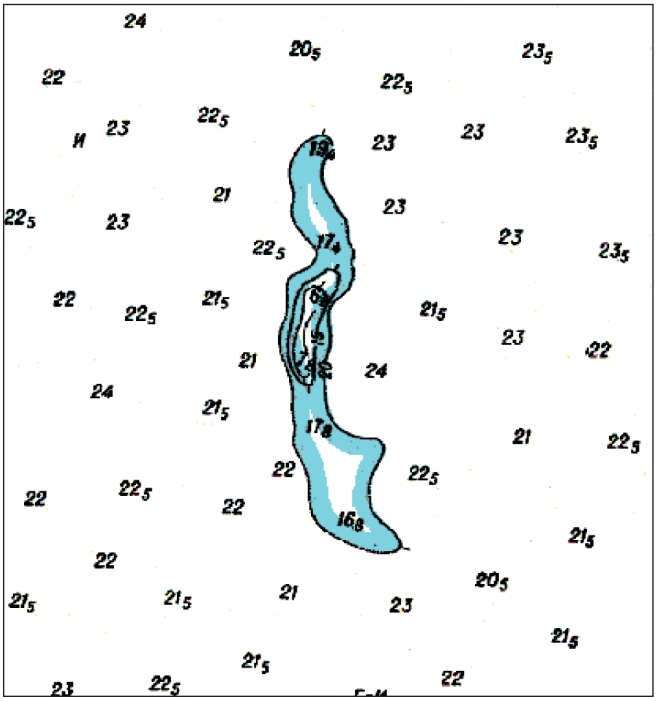


Рис. 2. Банка в Восточно-Сибирском море

На рис. 2 показана банка с глубиной над ней 6,8 м. Удаление банки от берега — 117 морских миль. Для сравнения, например, в Черном море удаление от берега на расстояние 25 морских миль гарантирует отсутствие подводных навигационных опасностей и наличие глубин под килем, превышающих 1600 м и более (рис. 3). В районе, показанном на рис. 3, 20-метровая изобата проходит на расстоянии всего 0,2 – 0,7 морских миль от берега.

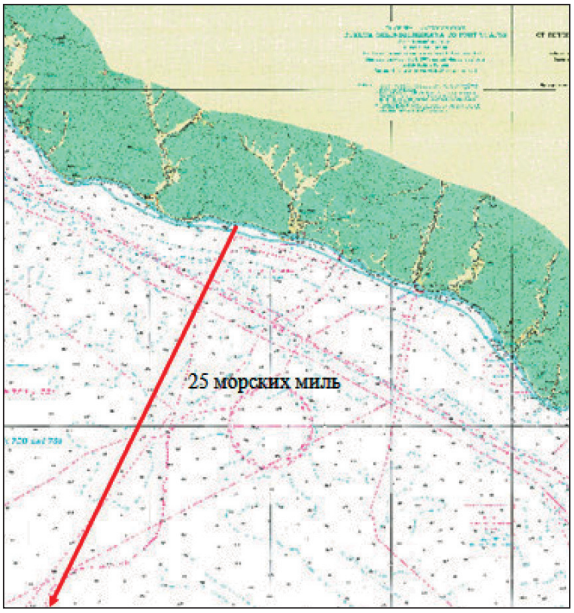


Рис. 3. Черное море (удаление от берега 25 морских миль)

По сравнению с акваторией СМП, подавляющее большинство прибрежных районов Мирового океана достаточно приглубы [19]. Это обстоятельство, учитывая размеры мелководья в акватории СМП, делает ее уникальной.

Второй фактор, формирующий гидрографические условия судоходства в акватории СМП, — это недостаточная гидрографическая изученность отдельных районов, вплоть до наличия «белых» пятен. Изученность акватории, в общем случае, определяется подробностью съемки рельефа дна. Подробность, в свою очередь, определяется дискретностью измерений. Практически на всей акватории СМП съемка рельефа дна выполнена однолучевым эхолотом с междугалсовыми расстояниями (дискретностью) в пределах 100–8000 м. Исключение составляют высокоширотная трасса, Обская губа и Енисейский залив [20], где было выполнено площадное обследование. Доля площади акваторий морей с недостаточной гидрографической изученностью составляет [2]: Карское море — 18 %, Море Лаптевых — 15 %, Восточно-Сибирское море — 51 %, Чукотское море — около 40 %.

Недостаточная гидрографическая изученность акватории приводит к необходимости учитывать не только, как обычно, навигационный запас глубины под килем [21], но и дополнительный запас, обусловленный неопределенностью значения глубины [5]. В этом случае оценка проходной глубины Z_s для судна, имеющего осадку d, для данной акватории выполняется по формуле

$$Z_s = d + \Delta + \Delta_L(p; L), \quad (1)$$

где Δ — навигационный запас глубины под килем;

$\Delta_L(p; L)$ — поправка за неопределенность значения глубины (гидрографический запас глубины под килем);

p — доверительная вероятность поправки $\Delta_L(p; L)$;

L — дискретность измерений глубин, выполненной съемки рельефа дна.

Гидрографический запас глубины увеличивает величину проходной глубины судна сверх обычного, тем самым сужая границы районов акватории, в пределах которых плавание судна с данной осадкой является безопасным. Определение проходной глубины судна позволяет одновременно очертить географические границы безопасных для плавания данного судна участков акватории СМП и небезопасные для судна районы. Гидрографические факторы в общем случае стационарны во времени, поэтому в дальнейшем будем считать их влияние на безопасность плавания судов неизменным.

Гидрометеорологические условия СМП формируются факторами ледовитости, ветром и волнением. Наличие льда на участке акватории приводит к ограничению скорости движения и маневрирования судов, вплоть до их полной остановки и невозможности дальнейшего движения по заданному курсу. Непроходимый для судна данного ледового класса лед формирует границы районов акватории, недоступных для плавания и в то же время позволяет определить безопасные с точки зрения ледовой угрозы участки. Ветер и волнение также приводят к ограничениям по скорости движения судна, вынуждая его маневрировать в пределах доступного, определенного значениями прочих факторов, района акватории. Гидрометеорологические условия изменяются во времени, поэтому в дальнейшем влияние гидрометеорологических факторов будем относить к определенному моменту t_i.

Целью настоящей статьи является разработка модели навигационных условий акватории, методики оценки влияния навигационных условий акватории на заданное судно и на этой основе методики оценки безопасности его плавания.

Методы и материалы (Methods and Materials)

Оценка акватории по критерию безопасности плавания основана на формализации задачи с помощью аппарата теории множеств. Аппарат векторной алгебры позволяет представить условия акватории и параметры судна как n-мерные векторы их состояний. Оценка безопасности плавания судна представляется как расстояние между этими векторами в n-мерном пространстве. Для оценки акватории A по критерию безопасности плавания судна S примем следующие определения.

1. Акватория $\{A\}$ — это область, имеющая установленные границы B_A.

2. Акватория имеет определенный уровень гидрографической изученности, обусловленный дискретностью измерений глубин выполненной съемки рельефа дна L_A. В момент времени t_i акватория $\{A\}$ характеризуется ледовитостью $I_A(t_i)$, ветрами $W_A(t_i)$ и волнением $V_A(t_i)$:

$$\{A\} = \{B_A, L_A, I_A(t_i), W_A(t_i), V_A(t_i)\}.$$

3. Судно $\{S\}$ — это множество, элементами которого являются характеристики судна: проходная глубина судна Z_S, вычисляемая для данной акватории $\{A\}$ по формуле (1), ледовый класс судна I_S, мореходность судна по ветру W_S и мореходность судна по волнению V_S:

$$\{S\} = \{Z_S, I_S, W_S, V_S\}.$$

4. Ледовый класс I_S — обозначает ледопроходимость судна, т. е. максимальную толщину и сплоченность льда, которые судно преодолевает без падения скорости перемещения до нуля.

5. Мореходность судна по ветру W_S — обозначает максимальную силу ветра, допустимую при эксплуатации судна.

6. Мореходность судна по волнению V_S — обозначает максимальную степень волнения, допустимую при эксплуатации судна.

Для характеристики акватории введем следующие обозначения:

– множество отмелей с глубинами Z менее, чем Z_S, обозначим $\{R_Z\}$;

– множество ледовых полей, непроходимых для судна с ледовым классом I_S, обозначим $\{R_I\}$;

– множество судов (интенсивность транспортного потока), гидротехнических сооружений, морских нефтегазодобывающих установок и прочих препятствий обозначим $\{R_D\}$.

Учитывая введенные ранее обозначения, свободный от непреодолимых препятствий безопасный участок акватории $\{A_{free}\}$ определяется следующим выражением:

$$\{A_{free}\} = [\{A\} - \{A\} \cap \{R_Z\}] \cap [\{A\} - \{A\} \cap \{R_I\}] \cap [\{A\} - \{A\} \cap \{R_D\}]. \quad (2)$$

Если $\{A_{free}\} = \varnothing$, то акватория недоступна для судна $\{S\}$ и является для него опасной. Если $\{A_{free}\} \neq \varnothing$, то акватория доступна для судна $\{S\}$.

Участки акватории $\{A_{free1}\}$, $\{A_{free2}\}$, $\{A_{free3}\}$, ..., $\{A_{freeN}\}$ образуют область безопасных маршрутов, если совместно выполняются следующие условия:

$$\{A_{free1}\} \cap \{A_{free2}\} \neq \varnothing;$$

$$\{A_{free2}\} \cap \{A_{free3}\} \neq \varnothing; \quad (3)$$

……..

$$\{A_{freeN-1}\} \cap \{A_{freeN}\} \neq \varnothing;$$

Доступные для плавания в момент времени t_i участки акватории $\{A(t_i)_{free}\} = \{B_A, L_A, I_A(t_i), W_A(t_i), V_A(t_i)\}$ характеризуются различными сочетаниями навигационных условий, параметры которых не превышают предельных для данного судна значений:

$$\left.\begin{aligned} I_A(t_i) &\le I_S; \\ W_A(t_i) &\le W_S; \\ V_A(t_i) &\le V_S. \end{aligned}\right\} \quad (4)$$

Эти условия определяют уровень безопасности плавания конкретного судна $\{S\} = \{Z_S, I_S, W_S, V_S\}$, который требует оценки.

Для оценки уровня безопасности плавания судна $\{S\} = \{Z_S, I_S, W_S, V_S\}$ на акватории $\{A(t_i) = \{B_A, L_A, I_A(t_i), W_A(t_i), V_A(t_i)\}$ примем следующие определения.

Вектор состояния акватории $\vec{A}(t_i) = A(Z_A, I_A(t_i), W_A(t_i), V_A(t_i), ...)$ *— в общем случае n-мерный вектор в евклидовом пространстве, координатами которого являются скалярные значения параметров* $(Z_A, I_A(t_i), W_A(t_i), V_A(t_i), ...)$, *где* Z_A *— массив глубин акватории*. Например, параметр I_A, обозначающий ледовитость акватории, может принимать значения от нуля (чистая вода) до десяти (сплошной лед).

Вектор состояния судна $\vec{S} = S(Z_S, I_S, W_s, V_S, ...)$ *в общем случае также n-мерный вектор в евклидовом пространстве, координатами которого являются скалярные значения параметров* $(Z_S, I_S, W_s, V_S, ...)$. Например, параметр I_S, класс ледовых усилений судна, принимающий значения от нуля (ледовые усиления отсутствуют) до десяти (ледовый класс Arc9).

Акватория $\vec{A}(t_i) = A(Z_A, I_A(t_i), W_A(t_i), V_A(t_i), ...)$ доступна для плавания судна $\vec{S} = S(Z_S, I_S, W_S, V_S, ...)$ по условию (2), поэтому для координат векторов $\vec{A}(t_i)$ и $\vec{S}$ справедливы неравенства:

$$\left.\begin{aligned} Z_A &\ge Z_S; \\ I_A(t_i) &\le I_S; \\ W_A(t_i) &\le W_S; \\ V_A(t_i) &\le V_S. \end{aligned}\right\} \quad (5)$$

Нормируем координаты вектора $\vec{A}(t_i)$, кроме координаты по глубине Z_A:

$$\vec{A}(t_i) = A_n\left(\frac{I_A(t_i)}{I_S}, \frac{W_A(t_i)}{W_S}, \frac{V_A(t_i)}{V_S}, \ ... \ \right). \quad (6)$$

В этом случае координаты вектора $\vec{A}(t_i)$ принимают значение от нуля до единицы, которые имеют следующий смысл: равенство единице какой-либо координаты вектора $\vec{A}(t_i)$ показывает, что преодоление влияния этого фактора судном достигается на пределе его возможностей и, наоборот, равенство нулю координаты показывает, что этот фактор на судно не оказывает никакого влияния.

Выполним нормирование координаты по глубине Z_A вектора $\vec{A}(t_i)$, руководствуясь следующими соображениями. Известно, что при навигационном запасе воды под килем в 5–6 м влияние стесненности судна своей осадкой на практически исчезает [22]. Поэтому условие безопасного плавания судна в выражении (1) можно записать в виде $\Delta \ge 6$. Тогда проходную глубину для судна Z_S, обусловленную только его осадкой d и гидрографическим запасом воды под килем $\Delta_L(p; L)$, можно определить по формуле

$$Z_S = d + \Delta_L(p; L). \quad (7)$$

Стесненность судна своей осадкой определяется величиной неравенства (5), лежащей в пределах от нуля (акватория недоступна по глубине), до шести метров (фактор глубины на судно не оказывает никакого влияния). Исходя из этого нормирование координаты вектора акватории $\overrightarrow{A_n(t_i)}$ по глубине выполним по формуле

$$\frac{Z_A}{Z_S} \to \frac{1}{Z_A - Z_S + 1} \quad (7)$$

и правилам:

$$\text{если } Z_A = Z_S, \text{ то } \frac{Z_A}{Z_S} = 1;$$

$$\text{если } Z_A - Z_S \geq 6, \text{ то } \frac{Z_A}{Z_S} = 0. \quad (8)$$

После нормирования координат вектора $\vec{A}_n(t_i)$ возможны следующие граничные состояния навигационных условий акватории по отношению к судну $\vec{S}$:

1) $\vec{A}_n(t_i) = A_n(0,\ 0,\ 0,\ ...)$ — вектор $\overrightarrow{A_n(t_i)}$ нулевой, значит, судно преодолевает акваторию в максимально благоприятных с точки зрения безопасности плавания условиях — *наилучший случай*;

2) $\vec{A}_n(t_i) = A_n(1,\ 1,\ 1,\ ...)$ — вектор $\overrightarrow{A_n(t_i)}$ совпадает с вектором $\vec{S} = S(Z_S,\ I_S,\ W_s,\ V_S,\ ...)$ значит, судно преодолевает акваторию на пределе своих возможностей, условия для безопасного плавания максимально неблагоприятны — *наихудший случай.*

Результаты (Results)

Мерой безопасности плавания судна $\vec{S}$ на акватории $\vec{A}(t_i)$ служит норма вектора $\vec{A}_n(t_i)$:

$$\left\|A_n(t_i)\right\| = \sqrt{\left(\frac{1}{Z_A - Z_S + 1}\right)^2 + \left(\frac{I_A(t_i)}{I_S}\right)^2 + + \left(\frac{W_A(t_i)}{W_S}\right)^2 + \left(\frac{V_A(t_i)}{V_S}\right)^2 + ...}, \quad (9)$$

а принятие решения осуществляется по правилу: *чем больше норма вектора* $\vec{A}_n(t_i)$, *тем акватория опаснее для плавания заданного судна*.

Обсуждение (Discussion)

Построенная модель позволит оценить влияние навигационных условий акватории на судно и на этом основании прогнозировать безопасность его плавания.

Выводы (Summary)

Предложенная методика позволяет для заданного судна или группы судов:

– выявлять участки акватории допустимые для плавания по условию (2);

– формировать области допустимых маршрутов по условию (3);

– сравнивать уровень безопасности плавания заданного судна на акваториях по параметру (9);

– выбирать наиболее безопасные маршруты.

Дальнейшее направление исследований состоит в разработке методики комплексной оценки безопасности плавания в акватории СМП, методики выбора оптимального маршрута и методики планирования дальнейшего совершенствования навигационно-гидрографического обеспечения СМП.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

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

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

3. *Рукша В. В.* Структура и динамика грузоперевозок по Северному морскому пути: история, настоящее и перспективы / В. В. Рукша, М. С. Белкин, А. А. Смирнов, В. Г. Арутюнян // Арктика: экология и экономика. — 2015. — № 4 (20). — С. 104–110.

4. Комплексный проект развития Северного пути: утв. Председателем Правительства РФ 5 июня 2015 г. № 3529п-П9.

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

6. Основы государственной политики Российской Федерации в Арктике на период до 2020 года и дальнейшую перспективу. Утверждены Президентом РФ 18 сентября 2008 года.

7. *Смирнов А. А.* Перспективы развития Северного морского пути (к 55-летию атомного ледокольного флота России) / А. А. Смирнов, С. А. Головинский // Арктика: экология и экономика. — 2014. — № 4 (16). — С. 108–114.

8. *Zhao H.* Study on Economic Evaluation of the Northern Sea Route: Taking the Voyage of Yong Sheng as an Example / H. Zhao, H. Hu // Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board. — 2016. — № 2549. — С. 78–85. DOI: 10.3141/2549-09.

9. *Збаращенко В. С.* Арктическая контейнерная линия Мурманск – Петропавловск – Мурманск // Транспорт и логистика в Арктике: альманах. — Вып. 1. — М.: Техносфера, 2015. — С. 61–67.

10. *Тезиков А. Л.* Гидрографическая изученность акватории Северного морского пути / А.Л. Тезиков, А. Б. Афонин, Е. О. Ольховик // Транспорт Российской Федерации. — 2018. — № 2 (75). — С. 19–21.

11. *Алексеев С. П.* Арктический шельф России — новые представления о рельефе дна бассейна / С. П. Алексеев, И. С. Грамберг, А. А. Комарицын, Г. Д. Нарышкин // Навигация и гидрография. — 2001. — № 12. — С. 9–13.

12. *Тезиков А. Л.* Гидрография моря: подробность съемки / А. Л. Тезиков, С. Г. Амельченко. — СПб.: Изд-во ГМА им. адм. С. О. Макарова, 2011. — 72 с.

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

14. *Padman L.* A barotropic inverse tidal model for the Arctic Ocean / L. Padman, S. Erofeeva // Geophysical Research Letters. — 2004. — Vol. 31. — Is. 2. DOI: 10.1029/2003GL019003.

15. *Клячкин С. В.* Численная модель прогноза распределения льдов в юго-западной части Охотского моря заблаговременностью 1–5 суток / С. В. Клячкин, З. М. Гудкович, Р. Б. Гузенко, Р. И. Май // Труды Гидрометеорологического научно-исследовательского центра Российской Федерации. — 2015. — № 353. — С. 63–87.

16. *Карелин И. Д.* Припай и заприпайные полыньи арктических морей сибирского шельфа в конце XX – начале XXI века / И. Д. Карелин, В. П. Карклин. — СПб.: Изд. ГНЦ РФ ААНИИ, 2012. — 180 с.

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

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

19. Рельеф дна Мирового океана, карта, адм номер 90095. — ГУНиО МО, 1984.

20. ФГУП «Гидрографическое предприятие» [Электронный ресурс] / Официальный сайт. — Режим доступа: http://www.hydro-state.ru/ (дата обращения: 25.10.2018).

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

22. *Бурханов М. В.* Справочная книжка штурмана / М. В. Бурханов. — М.: Транспорт, 1986. — 150 с.

REFERENCES

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

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

3. Ruksha, V. V., M. S. Belkin, A. A. Smirnov, and V. G. Arutyunyan. "Structure and dynamics of cargo transportation along the Northern Sea Route: the history, present and prospects." *Arctic: ecology and economy* 4(20) (2015): 104–110.

4. Russian Federation. Kompleksnyi proekt razvitiya Severnogo puti. Utverzhden Predsedatelem Pravitel'stva RF 5 iyunya 2015 g. № 3529p-P9.

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

6. Russian Federation. Osnovy gosudarstvennoj politiki Rossijskoj Federacii v Arktike na period do 2020 goda i dal'nejshuju perspektivu. Approved by the by the President of Russian Federation 18 September 2008.

7. Smirnov, A. A., and S. A. Golovinsky. "55 th Anniversary of the Russian Nuclear Icebreaker Fleet and Development of the Northern Sea Route." *Arctic: Ecology and Economy* 4(16) (2014): 108–114.

8. Zhao, Hui, and Hao Hu. "Study on Economic Evaluation of the Northern Sea Route: Taking the Voyage of Yong Sheng as an Example." *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board* 2549 (2016): 78–85. DOI: 10.3141/2549-09.

9. Zbarashchenko, V.S. "Arkticheskaya konteinernaya liniya Murmansk – Petropavlovsk – Murmansk." *Transport i logistika v Arktike. Al'manakh*. Is. 1. M.: Tekhnosfera, 2015. 61–67.

10. Tezikov, A. L., A. B. Afonin, and Ye. O. Olkhovik. "The state of hydrographic exploration of the Northern Sea Route water area." *Transport of Russian Federation* 2(75) (2018): 19–21.

11. Alekseev, S. P., I. S. Gramberg, A. A. Komaritsyn, and G.D. Naryshkin. "Arkticheskii shel'f Rossii - novye predstavleniya o rel'efe dna basseina." *Navigatsiya i gidrografiya* 12 (2001): 9–13.

12. Tezikov, A. L., and S. G. Amel'chenko. *Gidrografiya morya: podrobnost' s"emki*. SPb.: Izd-vo GMA im. adm. S. O. Makarova, 2011.

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

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

15. Klyachkin, S. V., Z. M. Gudkovich, R. B. Guzenko, and R. I. Mai. "Chislennaya model' prognoza raspredeleniya l'dov v yugo-zapadnoi chasti Okhotskogo morya zablagovremennost'yu 1-5 sutok." *Trudy Gidrometeorologicheskogo nauchno-issledovatel'skogo tsentra Rossiiskoi Federatsii* 353 (2015): 63–87.

16. Karelin, I. D., and V. P. Karklin. *Pripai i zapripainye polyn'i arkticheskikh morei sibirskogo shel'fa v kontse XX –nachale XXI veka*. SPb.: Izd. GNTs RF AANII, 2012.

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

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

19. *Rel'ef dna Mirovogo okeana, karta, adm nomer 90095.* GUNiO MO, 1984.
20. FGUP «Gidrograficheskoe predpriyatie». Web. 25 Oct. 2018 <http://www.hydro-state.ru/>.
21. Snopkov, V. I. *Upravlenie sudnom*. SPb.: ANO NPO «Professional», 2004.
22. Burkhanov, M.V. *Spravochnaya knizhka shturmana*. M.: Transport, 1986.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

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

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

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

Статья поступила в редакцию 30 октября 2018 г.
Received: October 30, 2018.

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

DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-6-1143-1151

THE FRACTURE MECHANISM FOR ICE BLOCKS BY PROPELLER JET FROM INCLINED AZIPOD IN THE ARCTIC REGION

A. A. Andreev

PAO SCF, St. Petersburg, Russian Federation

The article presents the results of full-scale tests of the constructive capabilities of the — «Azipod» type propulsion units for the development of the main methods of breaking ice in the theory. The study of the capabilities of these engines is carried out in many foreign countries, primarily in Finland and Canada, but in these developments, the emphasis has been shifted to studying the influence of the turbulent boundary layer and its exchange between the jet and the surrounding fluid. At the boundary between the jet and the stationary liquid, a viscosity field is formed, as a result of which vortices are generated. These vortices inhibit the movement of the jet, contributing to an increase in its mass. Propellers produce a flow that has a certain force, the advantage of wash is to reduce the concentration of ice and widen channel for other vessels. The author identify the propeller jet forces in breaking of the ice sheet and proposes to use the core of the jet, directing it directly to the ice cover. The observations were carried out on the tanker Timofey Guzhenko (PJSC Sovcomflot), equipped with an «Azipod» while passing through the ice . To assess the "hull - ice" interaction, an ice load monitoring system on the ship hull was used. As a result of theoretical studies and empirical observations, the author proposed six ways of breaking ice with a jet from an «Azipod»: breaking the ice with the help of jet power; the destruction of ice under the action of a bending moment; breaking ice due to pressure arising in the inter-haul space; breaking ice when driving at critical speeds (resonant); thermal and shock effect on ice massif. It was concluded that the potential capabilities of azimuth devices for breaking ice are practically not used in navigation, which reduces the efficiency of operation of double-acting vessels when sailing in the Arctic.

Keywords: navigation in the Arctic, «Azipod», methods for breaking ice, swimming in ice.

For citation:
Andreev, Alexander A. "The fracture mechanism for ice blocks by propeller jet from inclined azipod in the Arctic region." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 10.6 (2018): 1143–1151. DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-6-1143-1151.

УДК 656.61.052

СПОСОБЫ РАЗРУШЕНИЯ ЛЕДЯНОГО МАССИВА С ПОМОЩЬЮ НАКЛОННЫХ АЗИПОДОВ ПРИ ПЛАВАНИИ В АРКТИКЕ

А. А. Андреев

ПАО «Совкомфлот», Санкт-Петербург, Российская Федерация

В статье представлены результаты натурных испытаний конструктивных возможностей движителей типа «Azipod» по отработке основных, выделенных в теории, способов взлома льда. Исследование возможностей данных движителей проводится во многих зарубежных странах, прежде всего, в Финляндии и Канаде, однако в этих разработках основное внимание сосредоточено на изучении влияния пограничного турбулентного слоя и его обмен между струей и окружающей жидкостью. На границе между струей и неподвижной жидкостью образуется поле вязкости, вследствие чего зарождаются вихри, которые затормаживают движение струи, способствуя увеличению ее массы. Увлекая в движение жидкость и куски льда, они тем самым очищают канал или корпус какого-либо объекта. В связи с этим в исследовании предлагается использовать ядро струи, направляя его непосредственно на ледовый покров. Наблюдения проведены на танкере «Тимофей Гуженко» (ПАО «Совкомфлот»), оборудованном наклонной системой Azipod при прохождении через льды Арктического побережья. Для оценки взаимодействия «корпус – лед» использована система мониторинга нагрузки льда на корпус судна. В результате проведенных теоретических исследований и эмпирических наблюдений предлагается шесть способов разрушения льда струей от Azipod: взлом льда при помощи реактивной силы струи; разрушение льда под действием изгибающего момента; взлом льда за счет давления, возникающего в межледовом пространстве; взлом льда при движении

с критическими скоростями (резонансный); термический взлом и ударное воздействие на массив льда. Сделан вывод о том, что потенциальные возможности азимутальных устройств по взлому льда практически не используются в судовождении, что снижает эффективность эксплуатации судов двойного действия при плавании в Арктике.

Ключевые слова: судовождение в Арктике, Azipod, способы разрушения льда, плавание во льдах.

Для цитирования:
Андреев А. А. Способы разрушения ледяного массива с помощью наклонных азиподов при плавании в Арктике / А. А. Андреев // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2018. — Т. 10. — № 6. — С. 1143–1151. DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-6-1143-1151.

Введение (Introduction)

Развитие Северного морского пути и шельфа арктических морей требует использования технологий, способных успешно преодолеть арктические льды. Одной из таких технологий является устройство Azipod, установленное под наклоном к оси, и разработанный на ее основе принцип движения DAT (Dabble Acting Theory) с использованием от одного до нескольких Azipods[1]. Данные технологии демонстрируют и подтверждают свое преимущество по сравнению с обычным двигателем как в Арктике, так и в других районах плавания [1], [2]. В данной статье на основе многолетних наблюдений и опыта эксплуатации судов усиленного ледового класса и судов, оборудованных системой Azipod, выполнен анализ работы струи от устройства Azipod этой системы при ее воздействии на лед.

При разработке проектов судов, предназначенных для работы во льдах, принято описывать ледяной покров с помощью географических и физических характеристик, которые позволяют составить достаточно целостное представление о среде, с которой взаимодействует корпус судна. Под географическими характеристиками понимается морфология ледяного покрова, а под физическими характеристиками — физико-механические характеристики льда. Морские льды имеют сложное морфологическое строение, их толщина, разреженность, торосистость и другие характеристики подвержены существенной пространственно-временной изменчивости. Различия морфологических характеристик ледяного покрова связаны с действием ряда гидрометеорологических факторов и дрейфа льда [3].

Дрейф льда вызывает деформации, приводящие к образованию трещин, а также возникновению торосов и разводий. Непроходимым считается лед, находящийся в состоянии сильного сжатия под действием гидрометеорологических условий. Движение обычного ледокола при сильном сжатии практически невозможно и как минимум нецелесообразно, но при движении судна кормой, если оно оснащено системой Azipod, значительно уменьшается эффект сжатия за счет обмыва корпуса струей от винта.

Форма корпуса и мощность машины являются наиболее важными факторами для ледопроходимости. Также следует учитывать коэффициент трения корпуса о лед, который оказывает существенное влияние на ходкость судна. При движении кормой наиболее важным фактором является угол атаки струей льда. Успех работы транспортного судна, в отличие от ледокола, значительно зависит от энерговооруженности судна, т. е. отношения мощности к водоизмещению. Изменение предельной ледопроходимости ледоколов в различные периоды навигации является следствием изменения физико-механических характеристик льда.

Методы и материалы (Methods and Materials)

В результате проведения многочисленных эмпирических наблюдений было выявлено, что для успешного ледового плавания предпочтительным является строительство судов, сочетающих все рассмотренные далее процессы и способы форсирования льда.

[1] Azipod — запатентованное устройство и метод движения компании «ABB». Хельсинки, 2005.

Процесс разрушения морского льда. Разнообразие методов разрушения морского льда обусловлено различными видами деформирования ледяного покрова, такими как смятие, дробление, изгиб, срез со сдвигом, изгибно-гравитационное и термическое. Разрушение начинается с развития микротрещин за счет разрыва связей между отдельными кристаллами льда с постепенным переходом в наблюдаемые визуально трещины, переходящие в сдвиговые разломы с последующим образованием майн. Причинами локальных разрушающих напряжений во льдах могут являться следующие факторы:

– термические напряжения, образующие систему трещин;

– подъем уровня воды в результате увеличения давления за счет переноса потока воды;

– изгибные деформации ледяных полей, обусловленных гравитационными волнами за счет создания искусственной зыби поворотом Azipods из стороны в сторону.

Как показали исследования, выполненные в работе [4], динамика разрушения льда не отличается от механики деформирования и разрушения иных сред, и сплоченный консолидированный ледяной покров может быть представлен как связно-сыпучая среда. Так, в издании [5], в частности, отмечается, что, как правило, динамика и механика разрушения льда анализируются с использованием теорий упругости, вязкости и пластичности. В ряде зарубежных стран: Финляндии, Канаде, Норвегии и других, проводились многочисленные бассейновые испытания возможностей устройств Azipods по разрушению льда [6]–[8]. Так, Дж. М. Ферьери, Б. Вейчем и А. Акинтурком было установлено, что успешность взлома льда зависит, прежде всего, от скорости гребного винта и его мощности [6]. М. А. Амином, Б. Колбурном, Б. Вейчем был проведен и описан лабораторный эксперимент по воздействию струи от Azipod на поведение льда и определена динамика процесса [7]. Теоретические исследования показывают, что динамическое взаимодействие водяного потока и сплоченного льда имеют схожие особенности, проявляющиеся в подобии форм деформирования и разрушения льда: при относительно малой скорости движения лед более похож на пластическое тело, но с увеличением скорости его хрупкость возрастает.

Установленная на танкере «Тимофей Гуженко» система мониторинга нагрузки льда на корпус позволила провести натурные испытания при плавании во льдах Арктики и детально исследовать эволюцию динамических событий в процессе взаимодействия корпуса и льда, а также выявить их влияние на структуру ледяного покрова.

Поведение льда под нагрузкой. Наблюдения за ледяным покровом показали, что он находится под постоянным воздействием внешних факторов, генерирующих напряжения. Наиболее существенное влияние оказывают ветра, течения и колебания уровня моря [9]. Силы потока струи вызывают подвижку льда при одновременном воздействии указанных выше факторов, приводя к разрушению льда на большей площади по сравнению с обычным ледоколом.

Расчет прочности льда и сил, необходимых для ее преодоления, всегда зависит от эмпирических коэффициентов, вводимых исследователями на основании полученных экспериментальных данных для конкретного образца льда и определенного места исследования. Разрушение льда начинается с появления радиальных трещин, первоначально возникающих на нижней поверхности льда непосредственно под грузом. Когда растягивающие напряжения достигают предельного значения, образуются концентрические круговые трещины, по которым происходит обламывание образовавшихся секторов [10], но и после этого несущая способность ледяного покрова не становится нулевой, если не произойдет сдвиг обломков льда. Ледяной покров теряет несущую способность в том случае, когда под действием струи обломки льда расходятся, переворачиваются или тонут (втягиваются под лед).

В результате теоретических исследований и эмпирических наблюдений были выделены шесть способов разрушения льда струей от Azipod.

Способ 1. *Взлом льда при помощи реактивной силы струи.*

Маневрирование углом наклона азипода позволяет генерировать струи, воздействующие на лед снизу, не прилагая к нему значительный силовых усилий, подобных тем, которые необходимы

ледоколу для взлома льда. Рассматриваемый способ заключается в том, что разрушение льда происходит под действием собственной реактивной силы струи равной тяги винта на швартовых (рис. 1). Эта сила всегда больше усилия ледокола за счет отсутствия сил трения, т. е. номинальной мощности, на расстоянии, равном шести диаметрам винта [11]. Реактивная сила струи является непосредственным фактором, создающим деформацию сдвига, при которой лед обладает наименьшей прочностью.

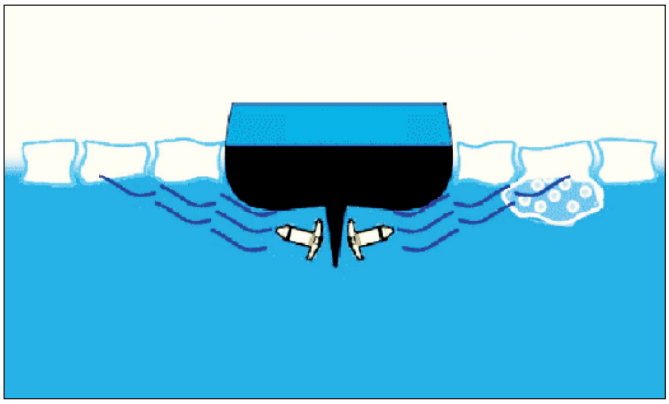


Рис. 1. Взлом льда при помощи реактивной силы струи

Способ 2. *Разрушение льда под действием изгибающего момента.*

Оценка влияния колебаний уровня моря на разлом неподвижного льда показывает, что наклон поверхности моря вдали от берегов обычно бывает небольшим и не может разломать льдину за счет изгиба. Вблизи берегов вероятность взлома льда зависит лишь от его деформации на изгиб в результате изменения уровня, так как оказываемое водой напряжение при этом несоизмеримо больше прочности льда. Поэтому, если наклон уровня создает изгиб льда, превышающий его предельное значение при пластическом изломе (10^3–10^4 Па) [9], то лед будет ломаться. Этим объясняются трещины во льду, тянущиеся вдоль береговой полосы. Так, в работе [12] автор справедливо отмечает, что при определении прочности сплошного ледяного покрова и больших ледяных полей, плавающих на поверхности моря, целесообразно рассматривать их как плиты на упругом основании. Деформация такой плиты зависит от характера приложения нагрузки и от времени ее действия.

Различают *статическую нагрузку*, т. е. неизменную во времени, и *динамическую нагрузку*, т. е. переменную во времени. Равновесие льда достигается благодаря силам тяжести и упругости. Проведенные в публикации [13] исследования на станции «Северный полюс-38» позволили сделать вывод о том, что при движении потока воды с большой скоростью уровень воды повышается за счет напора воды, и происходит изгиб ледяного покрова. Величина требуемого уровня повышения воды может быть рассчитана с высокой долей достоверности. Входящие параметры модели зависят от физико-механических характеристик льда и его толщины. В результате движения воды равновесие нарушается, и лед начинает самопроизвольно разрушаться под действием изгибающего момента (рис. 2).

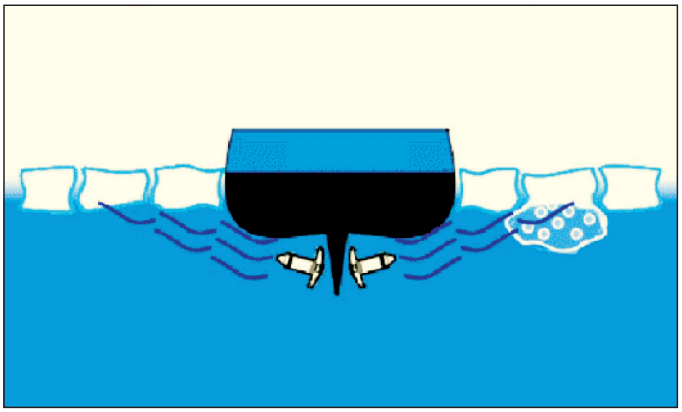


Рис. 2. Разрушение льда под действием изгибающего момента

Способ 3. *Взлом льда за счет давления, возникающего в межледовом пространстве.*

Разрушение ледяного массива может происходить за счет воды, проникающей через щели и трещины в ледяном покрове, в результате чего создается высокое давление в межледовом пространстве (рис. 3). Одновременно с этим инициируется *эффект кавитации*, проявляющийся в виде пузырьков воздуха, отбрасываемых лопастью винта с потоком. Этих усилий бывает достаточно для разрушения льда.

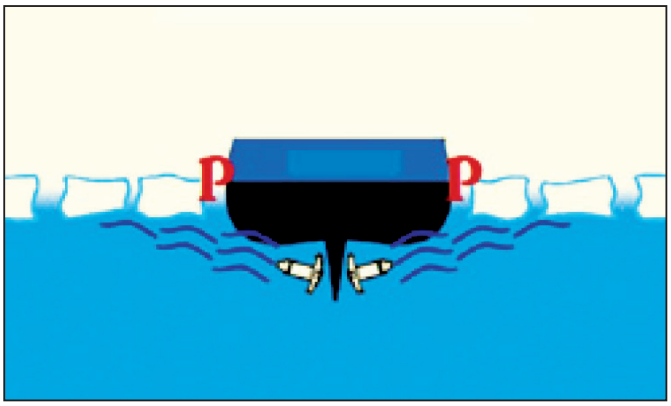


Рис. 3. Взлом льда за счет давления, возникающего в межледовом пространстве

Как известно, поверхности элементов конструкций, находящихся в контакте с жидкостью, давление которой является переменным, подвержены кавитационной эрозии [4], [14]. В частности, разрушение металла корпуса судна происходит в результате схлопывания кавитационных пузырьков, образующихся в результате импульсного давления. Фундаментальным для понимания разрушительного влияния кавитации является уяснение особенностей воздействия на тело отдельного пузырька. Несмотря на большое количество исследований этой проблемы, ряд важных вопросов до сих пор остается неизученным. В частности, отмечается, что давление образуется «за счет ударного воздействия на тело высокоскоростной струи жидкости, образующейся на поверхности пузырька при его схлопывании около тела. В процессе схлопывания пузырька струя становится все более выраженной, довольно быстро пересекает полость пузырька и бьет по телу либо непосредственно, если пузырек примыкает к телу, либо по поверхности прослойки жидкости между пузырьком и телом, если пузырек отстоит от тела на небольшое расстояние» [15, с. 156].

Решая задачу измерения характеристик ледяного покрова в работе [16], авторы обосновали изменение напряженного состояния упругого тела при нагрузке и определили, что удар струи с плоским концом приводит к увеличению напряжения по направлению оси симметрии струи с увеличением значения максимума через определенное время на расстоянии, примерно равном $0{,}75R$ от поверхности тела. При удалении от места приложения силы величина максимальных напряжений в теле падает, а зона, где они достигаются, оставаясь на оси симметрии, продвигается вглубь тела. Следовательно, при приложении нагрузки, соответствующей воздействию струи с плоским концом («жидкого молотка»), в теле возникают две наиболее напряженные зоны, в которых уровень максимальных по времени значений интенсивности напряжений будет значительно выше, чем вне этих зон. Первая (очень узкая) зона находится в окрестности центра круговой области нагружения, а вторая, значительно больших размеров — внутри тела в области оси симметрии, на удалении от поверхности тела примерно на 0,75 радиуса струи.

Способ 4. *Взлом льда при движении с критическими скоростями (резонансный).*

Резонансный способ разрушения льда формируется с помощью движения азипода, генерирующего изгибные и гравитационные волны в системе *лед – вода*. Физическая картина разрушения льда при резонансном способе заключается в том, что при движении нагрузки по льду

снизу в виде потока воды в результате вращения Azipod с периодом 12 с в ледяном покрове и воде возникает система изгибных и гравитационных волн. Моделируя разрушения ледяных заторов методом динамического воздействия, автор в работе [17] рассчитал, что при определенной, близкой к фазовой скорости изгибных колебаний ледяного покрова и гравитационных волн воде, наступает резонанс. Амплитуда колебаний ледяного покрова резко возрастает, и лед начинает разрушаться (рис. 4).

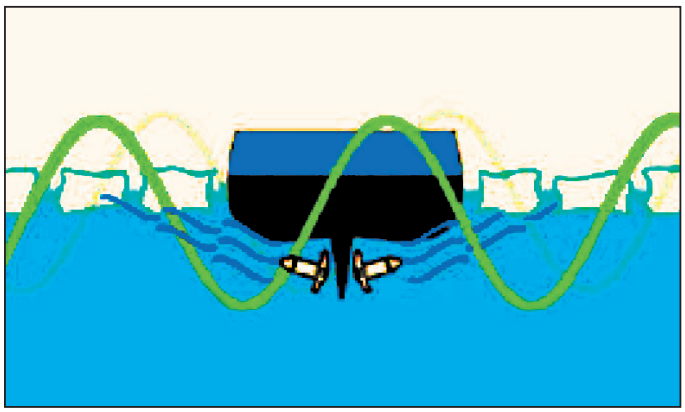


Рис. 4. Взлом льда при движении с критическими скоростями

Скорости движения нагрузки при разрушении льда были названы *критическими*, или *резонансными*, а сам метод получил название *резонансно-изгибно-гравитационного.*

Способ 5. *Термический.*

Анализ показал, что изменение температуры воздуха в течение годичного цикла приводит к изменению физико-механических характеристик льда, которое, в свою очередь, обусловливает изменение скорости движения ледокола в сплошном льду. При этом понижение средней температуры воздуха сопровождается увеличением числовых значений всех исследуемых физико-механических характеристик льда. В результате попадания больших объемов воды на поверхность льда за счет свободного пространства между судном и краем льда можно добиться полного покрытия поля льда водой в радиусе 50 м, после чего лед начинает разрушаться. Разрушение льда происходит за счет термических напряжений, образующих систему трещин во льду за счет разности температур наружного воздуха и, соответственно, льда и воды, покрывающей лед (рис. 5).

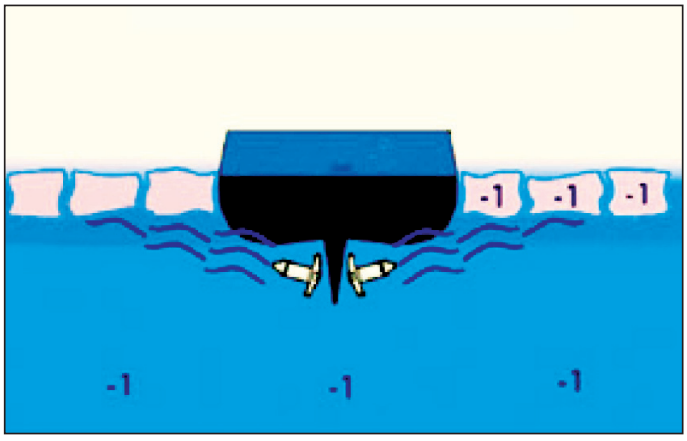


Рис. 5. Термический способ разрушения льда

Способ 6. *Ударное воздействие.*

Винты судов, оборудованных системой Azipod, спроектированы с достаточной прочностью, чтобы разрушать лед своими лопастями, причем за счет вращения Azipods отпадает необходи-

мость реверсирования, и, соответственно, винт всегда вращается, что является основным фактором, препятствующим поломке лопастей [18], [19]. При вращении винт захватывает куски льда, отбрасывая их вместе с потоком воды. Эти куски летят со скоростью около 10 м/с и ударяясь о лед, разрушают монолитность ледяного поля (рис. 6).

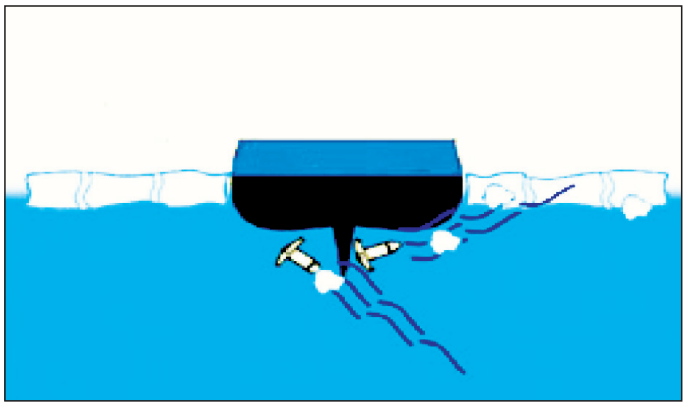


Рис. 6. Взлом льда посредством ударного воздействия

Наглядным доказательством этого эффекта служат многочисленные вмятины на корпусе танкера «Тимофей Гуженко» после двух лет эксплуатации, потребовавшие дополнительного укрепления корпуса в кормовой части, находящейся под прямым воздействием потока воды.

Выводы (Summary)

На основе выполненного исследования можно сделать следующие выводы.

1. Проведенные испытания конструктивных возможностей установок конструктивного типа Azipod по взлому ледовых полей Арктики выходят далеко за рамки своего первоначального предназначения.

2. Натурные наблюдения, проведенные с использованием системы мониторинга нагрузки льда на корпус судна, позволяют обосновать целесообразность дальнейшего теоретического исследования вопроса научным сообществом.

3. Маневрирование углом наклона Azipod позволяет осуществлять взлом льда, генерируя и совмещая все основные виды напряжений, такие как реактивная сила струи, изгибающий момент, инициация давления в межледовом пространстве, термическое и ударное воздействия.

4. В результате работы устройствами Azipod при движении во льду образуются наклонные струи. Исследования и теоретические модели определяют их величину в пределах 30 м в сторону от корпуса. В результате воздействия ударной силы струи происходит разлом льда на значительном расстоянии, что приводит к увеличению ширины канала. При умелом маневрировании устройствами Azipod судоводитель может регулировать ширину канала, изменяя угол наклона Azipod. Открывшиеся возможности позволяют ледоколу, оборудованному наклонными устройствами Azipod, осуществлять проводку судов, прокладывая канал увеличенной ширины, что дает возможность отказаться от проводки крупнотоннажных судов двумя ледоколами.

5. Требуется разработка методики управления устройствами Azipod и создание тренажера для обучения судоводителей. Именно в этом случае, наряду с решением организационных вопросов плавания по трассам Северного морского пути [20], можно решить задачу круглогодичной навигации с минимальными затратами. Полноценное использование возможностей устройств Azipod позволяет значительно сократить потребности в ледокольных мощностях и сэкономить ограниченные финансовые ресурсы на их строительство без ущерба для хозяйственного освоения Арктики.

6. Данные проведенных исследований в практической плоскости использованы при разработке программы ледовых испытаний танкеров-газовозов, строящихся для проекта Ямал – СПГ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Таровик О. В.* Анализ результатов попутных исследований ходкости танкера «Капитан Готский» в мелкобитых льдах / О. В. Таровик // Тр. ЦНИИ им. акад. А. Н. Крылова. — 2011. — № 63 (347). — С. 59–68.

2. *Голиков В. В.* Методологические основы управления судном с двумя поворотными колонками азипод / В. В. Голиков // Судовождение. — 2013. — № 23. — С. 56–65.

3. *Миронов Е. У.* Современные методы ледовых исследований и изысканий на шельфе арктических морей / Е. У. Миронов, Ю. П. Гудошников, В. Н. Смирнов // Проблемы Арктики и Антарктики. — 2015. — № 1 (103). — С. 57–68.

4. *Аганин А. А.* Реакция упругого полупространства на ударное воздействие струи / А. А. Аганин, Т. Ф. Халитова, Н. А. Хисматуллина // Филология и культура. — 2011. — № 2 (24). — С. 6–12.

5. *Смирнов В. Н.* Методическое пособие по изучению физико-механических характеристик ледяных образований как исходных данных для расчета ледовых нагрузок на берега, дно и морские сооружения / В. Н. Смирнов, А. И. Шушлебин, С. М. Ковалев, И. Б. Шейкин. — СПб.: ГНЦ РФ ААНИИ, 2011. — 179 с.

6. *Ferrieri J. M.* Experimental study on ice management through the use of podded propeller wash / J. M. Ferrieri, B. Veitch, A. Akinturk // Third International Symposium on Marine propulsors smp'13, Launceston, Australia. — 2013. — Pp. 26–33.

7. *Amin M. A.* Experimental Investigation of propeller Wake Velocity Field for the Major Factors Affecting Propeller Wake Wash / M. A. Amin, B. Colbourne, B. Veitch // J. Mar. Sci. Eng. — 2018. — Vol. 6. — Is. 2. — Pp. 50; DOI: 10.3390/jmse6020050.

8. *Taimuri G. H.* Level Ice Clearing in Model and Full Scale Using Azimuthing Propulsion / G. H. Taimuri, P. Kujala, T. Leiviskä, P. Määttänen // OTC Arctic Technology Conference. — Offshore Technology Conference, 2018. DOI: 10.4043/29179-MS.

9. *Доронин Ю. П.* Морской лед / Ю. П. Доронин, Д. Е. Хейсин. — Л.: Гидрометеоиздат, 1975. — 147 с.

10. *Smirnov V. N.* On dynamics, deformation mechanics and self-organization sea ice / V. N. Smirnov, I. B. Sheykin, A. E. Chmel // POAC '09: Proceedings of the International Conference on Port and Ocean Engineering under Arctic Conditions. — 2009. — Pp. 369–377.

11. *Доронин Ю. П.* Физика океана / Ю. П. Доронин. — СПб: РГТМУ, 2000. — 305 с.

12. *Латухов С. В.* Экологическая безопасность морских операций в западном регионе российской Арктики: автореф. дис. … д-ра геогр. наук / С. В. Латухов. — СПб., 1998. — 35 с.

13. *Смирнов В. Н.* Динамика процесса разлома дрейфующего ледяного поля станции «Северный полюс- 38» / В. Н. Смирнов, Л. В. Панов, В. Т. Соколов // Проблемы Арктики и Антарктики. — 2013. — № 4 (98). — С. 26–34.

14. *Шестоперов В. Ю.* Сопротивление материалов кавитационной эрозии и критерии оценки их стойкости / В. Ю. Шестоперов // Современные проблемы науки и образования. — 2015. – № 1-1. — С. 316.

15. *Нагучев Д. Ш.* Разработка технологии создания технических средств освещения ледовой обстановки в параметрическом режиме / Д. Ш. Нагучев, В. Л. Сахаров, О. А. Савицкий // Известия ЮФУ. Технические науки. — 2013. — № 9 (146). — С. 155–160.

16. *Степанюк И. А.* Метод измерений характеристик динамики ледяного покрова / И. А. Степанюк, В. Н. Смирнов. — СПб.: Гидрометеоиздат, 2001. — 135 с.

17. *Прокудин А. Н.* Численное исследование нового способа разрушения ледяных заторов на реках динамическим воздействием / А. Н. Прокудин // Ученые записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. — 2012. — Т. 1. — № 9. — С. 41–48.

18. *Ueland S.* Control Strategies for Maneuvering in Ice Ridge and Multi Ice Regimes: Master thesis / S. Ueland, S. W. Slettebø. — Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet, Fakultet for ingeniørvitenskap og teknologi, Institutt for marin teknikk, 2010. — 104 p.

19. Практические рекомендации капитанов СКФ по управлению судами в ледовых условиях. — М.: Изд-во Паулсен, 2017. — С. 168.

20. *Андреева М. Ю.* Северный морской путь в политике экономического прорыва России: некоторые оценки и предпосылки / М. Ю. Андреева // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2015. — № 2 (30). — С. 164–171. DOI: 10.21821/2309-5180-2015-7-2-164-171.

REFERENCES

1. Tarovik, O. V. "Analiz rezultatov poputnyh issledovanij hodkosti tankera «Kapitan Gotskij» v melkobityh ldah." *Trudy CNII im.akad. A. N.Krylova* 63(347) (2011): 59–68.

2. Golikov, V. V. "Metodologicheskie osnovy upravlenija sudnom s dvumja povorotnymi kolonkami azipod." *Sudovozhdenie* 23 (2013): 56–65.

3. Mironov, E. U., Ju. P. Gudoshnikov, and V. N. Smirnov. "Sovremennye metody ledovyh issledovanij i izyskanij na shelfe arkticheskih morej." *Problemy Arktiki i Antarktiki* 1(103) (2015): 57–68.

4. Aganin, A. A., T. F. Khalitiva, and N.A. Khismatullina. "The response of the elastic semi-space to the impact of a jet." *Philology and Culture* 2*(*24) (2011): 6–12.

5. Smirnov, V. N., A. I. Shushlebin, S. M. Kovalev, and I. B. Shejkin. *Metodicheskoe posobie po izucheniju fiziko-mehanicheskih harakteristik ledjanyh obrazovanij kak ishodnyh dannyh dlja rascheta ledovyh nagruzok na berega, dno i morskie sooruzhenija*. SPb.: GNC RF AANII, 2011.

6. Ferrieri, Jenna M., Brian Veitch, and Ayhan Akinturk. "Experimental study on ice management through the use of podded propeller wash." *Third International Symposium on Marine propulsors smp'13, Launceston, Australia*. 2013. 26–33.

7. Amin, Md. Asif, Bruce Colbourne, and Brian Veitch. "Experimental Investigation of propeller Wake Velocity Field for the Major Factors Affecting Propeller Wake Wash." *J. Mar. Sci. Eng.* 6(2) (2018): 50. DOI: 10.3390/jmse6020050

8. Taimuri, Ghalib Humayun, Pentti Kujala, Topi Leiviskä, and Pirjo Määttänen. "Level Ice Clearing in Model and Full Scale Using Azimuthing Propulsion." *OTC Arctic Technology Conference*. Offshore Technology Conference, 2018. DOI: 10.4043/29179-MS.

9. Doronin, Ju. P., and D. E. Hejsin. *Morskoj led*. L.: Gidrometeoizdat, 1975.

10. Smirnov, Victor N., Igor B. Sheykin, and Alexander E. Chmel. "On Dynamics, Deformation Mechanics and Self-Organization Sea Ice." *Proceedings of the International Conference on Port and Ocean Engineering Under Arctic Conditions*. No. POAC09-45. 2009. 369–377.

11. Doronin, Ju. P. *Fizika okeana*. SPb: RGTMU, 2000.

12. Latuhov, S. V. Jekologicheskaja bezopasnost morskih operacij v zapadnom regione rossijskoj Arktiki. Abstract of Dr. diss. (Geographic Sciences). SPb., 1998.

13. Smirnov, V. N., L.V. Panov, and V.T. Sokolov. "Dinamika processa razloma drejfujushhego ledjanogo polja stancii "Severnyj poljus -38"." *Problemy Arktiki i Antarktiki* 4(98) (2013): 26–34.

14. Shestoperov, V. Yu. "Resistance of materials of the cavitation erosion and criteria of the estimation of their firmness." *Modern problems of science and education* 1-1 (2015): 316.

15. Nagutchev, Daulet Shabanovitch, Vadim Leonidovitch Sakharov, and Oleg Anatolievitch Savitskiy. "Technology development of technical means of ice conditions monitoring in the parametric mode." *Izvestiya SFedU. Engineering sciences* 9(146) (2013): 155–160.

16. Stepanjuk, I. A., and V. N. Smirnov. *Metod izmerenij harakteristik dinamiki ledjanogo pokrova*. SPb.: Gidrometeoizdat, 2001.

17. Prokudin, Alexander N. "Numerical investigation of a new ice-jams removal method by means of dynamic impact." *Scholarly Notes of Komsomolsk-na-Amure State Technical University* 1.9 (2012): 41–48.

18. Ueland, Sindre, and Sverre Wendt Slettebø. Control Strategies for Maneuvering in Ice Ridge and Multi Ice Regimes. MS thesis. Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet, Fakultet for ingeniørvitenskap og teknologi, Institutt for marin teknikk, 2010.

19. *Prakticheskie rekomendacii kapitanov SUF po upravleniju sudami v ledovyh uslovijah*. M.: Izd-vo Paulsen, 2017.

20. Andreeva, M. Ju. "Some aspects and assessment of NSR as a way of economic rising of Russia." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova* 2(30) (2015): 164–171. DOI: 10.21821/2309-5180-2015-7-2-164-171.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Андреев Александр Алексеевич —
Заслуженный работник морского транспорта,
Почетный полярник,
Советник Генерального директора
ПАО «Совкомфлот»
125047, Российская Федерация, Москва,
ул. Гашека, 6
e-mail: *alexander.andreev@scf-group*

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Andreev, Alexander A. —
Honoured Transport Worker of the Russian Federation,
Honorury polar exploer,
CEO's councelor
PAO SCF
6, Gasheka Str., Moscow, 125047,
Russian Federation
e-mail: *alexander.andreev@scf-group.ru*

Статья поступила в редакцию 6 декабря 2018 г.
Received: December 6, 2018.

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

DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-6-1152-1161

MODERN REQUIREMENTS TO THE RULES OF TECHNICAL OPERATION OF PORT HANDLING EQUIPMENT

I. V. Zub, Yu. E. Ezhov, V. A. Sidorenko

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

The article analyzes the accidents and failures of handling equipment, which occur in most cases due to violations of the rules of technical operation, and is a necessary and sufficient document that allows, subject to all the provisions specified in them, to ensure trouble-free operation of handling equipment. It is noted that in recent years there has been a revision of the basic regulations governing the operation of transshipment equipment, some of the guidance documents and GOSTs have been canceled or replaced by new ones, but RD 31.1.02– 04 "Rules of technical operation of lifting and transport equipment of sea trade ports" remains in force today. It is emphasized that the main task of the technical operation of reloading equipment is the organization and management of the process of maintaining them in good and working condition through the implementation of maintenance and repair, as well as monitoring compliance with applicable rules and regulations in the operation of reloading equipment. It is specified that the methods of the organization and carrying out repair recommended in RD 31.1.02–04 are not demanded now because of introduction of digital technologies and transition to system of repair of the reloading equipment on technical condition. In accordance with GOST 18322-2016, maintenance can be carried out in several stages, which, in principle, provides an increase in the coefficient of technical use of handling equipment. Attention is drawn to the fact that quite often the companies operating the handling equipment transfer its maintenance and repair to outsourcing, thereby reducing the repair service to a minimum. It is noted that all issues related to the operation of handling equipment in the new conditions should be reflected in the new "Rules of technical operation".

Keywords: the technical operation of the system of technical maintenance and repair of port handling equipment.

For citation:
Zub, Igor V., Yurii E. Ezhov, and Vladimir A. Sidorenko. "Modern requirements to the rules of technical operation of port handling equipment." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova* 10.6 (2018): 1152–1161. DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-6-1152-1161.

УДК 656.613: 656.614.35: 65.011.56

СОВРЕМЕННЫЕ ТРЕБОВАНИЯ К ПРАВИЛАМ ТЕХНИЧЕСКОЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ ПОРТОВОГО ПЕРЕГРУЗОЧНОГО ОБОРУДОВАНИЯ

И. В. Зуб, Ю. Е. Ежов, В. А. Сидоренко

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

В статье проанализированы аварии и отказы перегрузочного оборудования, которые происходят в большинстве случаев из-за нарушений правил технической эксплуатации и являются необходимым и достаточным документом, позволяющим при соблюдении всех указанных в них положений обеспечить безаварийную работу перегрузочного оборудования. Отмечается, что в последние годы произошел пересмотр основных нормативных актов, определяющих эксплуатацию перегрузочного оборудования, часть руководящих документов и ГОСТов были отменены или заменены на новые, однако РД 31.1.02– 04 «Правила технической эксплуатации подъемно-транспортного оборудования морских торговых портов» остается действующим и сегодня. Особо подчеркивается, что основной задачей технической эксплуатации перегрузочного оборудования являются организация и управление процессом поддержания их в исправном и работоспособном состоянии посредством реализации системы технического обслуживания и ремонта, а также контроль за соблюдением действующих норм и правил при эксплуатации перегрузочного оборудования.

Указывается, что рекомендованные в РД 31.1.02–04 методы организации и проведения ремонта в настоящее время не востребованы из-за внедрения цифровых технологий и перехода на систему ремонта перегрузочного оборудования по техническому состоянию. В соответствии с ГОСТ 18322–2016, техническое обслуживание можно проводить в несколько этапов, что, в принципе, обеспечивает повышение коэффициента технического использования перегрузочного оборудования. Обращается внимание на то, что достаточно часто компании, эксплуатирующие перегрузочное оборудование, переводят его техническое обслуживание и ремонт на аутсорсинг, тем самым сокращая ремонтную службу до минимума. Отмечается, что все вопросы, связанные с эксплуатацией перегрузочного оборудования в новых условиях, необходимо отразить в новых «Правилах технической эксплуатации».

Ключевые слова: правила технической эксплуатации, система технического обслуживания и ремонта, портовое перегрузочное оборудование.

Для цитирования:
Зуб И. В. Современные требования к правилам технической эксплуатации портового перегрузочного оборудования / И. В. Зуб, Ю. Е. Ежов, В. А. Сидоренко // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2018. — Т. 10. — № 6. — С. 1152–1161. DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-6-1152-1161.

Введение (Introduction)

При изучении проблемы научно-технического прогресса значительная роль отводится подъемно-транспортному машиностроению, перед которым поставлена задача широкого внедрения комплексной механизации и автоматизации производственных процессов и вспомогательных технологических операций. Современные поточные технологические и автоматизированные линии требуют применения разнообразных типов подъемно-транспортных машин и механизмов, обеспечивающих непрерывность и ритмичность производственных процессов. Поэтому подъемно-транспортное оборудование в настоящее время является одним из основных решающих факторов, определяющих эффективность производства.

Грузоподъемные машины при неправильной эксплуатации или вследствие промахов, допущенных в процессе изготовления, могут представлять опасность для обслуживающего персонала и для лиц, находящихся в зоне их действия. Поэтому в целях обеспечения безопасности разработка, изготовление и эксплуатация грузоподъемных машин строго регламентированы положениями технического регламента Таможенного союза ЕврАзЭС «Безопасность машин и оборудования» ТР ТС 010–2011 [1] и взаимосвязанными с ним стандартами, Федеральным законом «О промышленной безопасности опасных производственных объектов» от 21 июля 1997 г. № 116–ФЗ [2], а также федеральными нормами и правилами в области промышленной безопасности, в частности, такими, как «Правила безопасности опасных производственных объектов, на которых используются подъемные сооружения», утвержденными Приказом Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору от 12 ноября 2013 г. № 533.

Наиболее частыми причинами аварий и отказов подъемно-транспортного оборудования (ПТО) является нарушение правил технической эксплуатации (ПТЭ). При эксплуатации современного ПТО потери от простоев и, соответственно, от упущенной выгоды являются следствием как отказов отдельных узлов и деталей, так и снижениям эффективности функционирования ПТО при обслуживании транспортных средств. Для повышения коэффициента технического использования и коэффициента готовности разрабатываются методы, позволяющие прогнозировать надежность оборудования, совершенствовать систему технического обслуживания и ремонта (ТО и Р), проводить ремонт механизмов по фактическому состоянию, а также определять необходимость наличия запасных частей.

В 2004 г. в действие вступил РД 31.1.02–04 «Правила технической эксплуатации подъемно-транспортного оборудования морских торговых портов» [3], основанный на законодательных актах: Федеральном законе № 116–ФЗ «О промышленной безопасности опасных производственных объектов» [2] и «Правилах устройства и безопасной эксплуатации грузоподъемных кранов. ПБ 10-382-00» [4], которые были отменены 7 марта 2014 г. Вместо них были введены «Правила

безопасности опасных производственных объектов, на которых используются подъемные сооружения» [5] (далее — Правила). Требования этого документа распространяются на опасные производственные объекты, на которых применяются следующие подъемные сооружения и оборудование, используемое в составе опасного производственного объекта: грузоподъемные краны всех типов; мостовые краны штабелеры; краны-трубоукладчики; краны-манипуляторы; строительные подъемники; подъемники и вышки, предназначенные для перемещения людей; грузовые электрические тележки, передвигающиеся по надземным рельсовым путям совместно с кабиной управления; электрические тали; краны-экскаваторы, предназначенные только для работы с крюком, подвешенным на канате, или электромагнитом; сменные грузозахватные органы (крюки, грейферы, магниты) и съемные грузозахватные приспособления (траверсы, грейферы, захваты, стропы), используемые совместно с кранами для подъема и перемещения грузов; тара для транспортировки грузов, отнесенных к категории опасных, за исключением специальной тары, применяемой в металлургическом производстве, а также специальной тары, используемой в морских и речных портах; специальные съемные кабины и люльки, навешиваемые на грузозахватные органы кранов и используемые для подъема и перемещения людей; рельсовые пути (для опорных и подвесных подъемных сооружений), передвигающихся по рельсам.

В то же время РД 31.1.02–04 остается действующим и является необходимым и достаточным документом, позволяющим при соблюдении всех указанных в нем положений обеспечить безаварийную работу перегрузочного оборудования морских торговых портов. Однако он не в полной мере учитывает положения, прописанные в новых нормативных документах [2] и [5]. При организации технической эксплуатации ПТО, поднадзорного Ростехнадзору, можно руководствоваться Правилами [5] и другими действующими документами, на поиск которых затрачивается определенное время, что снижает оперативность работы. При эксплуатации ПТО (автопогрузчики, терминальные тягачи, ричстакеры, автоконтейнеровозы, перегружатели на базе экскаваторной техники, конвейеры на специализированных терминалах), которое не подпадает под Правила [5], остается только один документ — рекомендация завода-изготовителя, которая не является законодательным актом и носит рекомендательный характер. В настоящее время существует необходимость разработки новых ПТЭ перегрузочного оборудования морских торговых портов, имеющих следующие цели:

– обеспечение надежной, безопасной и рациональной эксплуатации ПТО портов;

– содержание ПТО в работоспособном или исправном состоянии;

– обеспечение требований промышленной безопасности на опасных производственных объектах.

Методы и материалы (Methods and Materials)

В работе использованы методы анализа нормативных документов и литературных источников с целью установления действующих и утративших силу нормативных актов, которые были использованы в РД 31.1.02–04 [3]. При анализе нормативных документов были рассмотрены современные методы организации, планирования и производства ТО и Р.

Результаты (Results)

Техническое состояние ПТО определяется наличием или отсутствием дефектов, нарушающих их исправное и работоспособное состояние, а также качество функционирования, оказывающее влияние на их производительность. Современные машины оборудованы бортовыми компьютерами, на базе которых [6] для ПТО созданы автоматизированные системы диагностики. Существующие системы диагностики используются как стационарные датчики, считывающие показания систем и механизмов ПТО во время эксплуатации, так и переносное оборудование, позволяющее определять техническое состояние ПТО во время проведения регламентных работ по техническому обслуживанию. Такой комплекс диагностических мероприятий обеспечивает постоянный контроль за техническим состоянием машин и механизмов. Использование систем

автоматизированного управления и проведение ремонта по существующему техническому состоянию сокращает расходы на техническую эксплуатацию [7], [8], повышает рентабельность оборудования транспортных терминалов, а также снижает себестоимость перегрузочных работ.

Дистанционное считывание данных позволило разработать системы автоматического управления системой ТО и Р [9]–[11]. Диагностическая система передает информацию о техническом состоянии оборудования в ремонтную или сервисную службу. По имеющейся информации, прогнозируется наработка на отказ, что позволяет проводить регламентные работы по ТО и Р до аварийной остановки оборудования.

Преимущества автоматизированной системы ТО и Р состоят в применении стратегии проведения ремонта по техническому состоянию [6], [11], [12], а также планировании периодичности ТО и Р в установленные технической документацией периоды [13]. Эта стратегия не определяет точного времени и объема ремонта, так как основанием для ремонта являются не рекомендации завода-изготовителя, а результаты диагностики оборудования. При принятии организацией, эксплуатирующей ПТО, стратегии ремонта по техническому состоянию ведется постоянный мониторинг за техническим состоянием ПТО, что позволяет своевременно выявить отклонение параметров от заданных значений и предпринять корректирующие меры. Превентивные меры способствуют профилактике возникновению отказов, что ведет к снижению эксплуатационных расходов и, повышению надежности оборудования.

Дистанционная система контроля охватывает не только отдельные технические устройства, но и целые объекты. Проект Федерального закона [14], внесенного на обсуждение в Государственную думу, посвящен этим вопросам. Согласно проекту Федерального закона, на опасных производственных объектах I и II классов с 1 января 2020 г. будет установлена система дистанционного контроля, представляющая собой комплекс программных и программно-аппаратных средств. Эта система должна осуществлять мониторинг в режиме реального времени состояния технических устройств, параметры технологических процессов и процессов обеспечения функционирования опасного производственного объекта, определяющих его безопасность, а также регистрацию аварий и инцидентов. Опасные производственные объекты III и IV классов, по решению эксплуатирующей организации, могут быть оснащены системами дистанционного контроля. ПТО портов, если оно расположено не на намывных территориях, относится к IV классу опасности [2], [15]. Обеспечение надежной эксплуатации ПТО зависит как от квалификации оператора, так и от квалификации ремонтного персонала. В связи с изменением формы собственности стивидорных компаний изменилась и их организационная структура. Тем не менее РД 31.01.02-04 являются обязательным документом для всех организаций независимо от их организационно-правовой формы и формы собственности.

В современных условиях ремонтные службы во многих стивидорных компаниях либо отсутствуют, либо выделены в отдельную структуру и имеют статус юридического лица. При отсутствии своей ремонтной службы стивидорная компания заключает договор с сервисной организацией на обслуживание перегрузочного оборудования (аутсорсинг). Требования Правил [5] относятся как к организациям, работающим по аутсорсингу, так и к сотрудникам ремонтных служб портов и терминалов.

В связи с совершенствованием ПТО возрастают требования к техническому и административному персоналу ремонтных служб. Со стороны государства для обеспечения эксплуатации ПТО вводятся профессиональные стандарты. В основах государственной политики в области промышленной безопасности отмечается, что отсутствие обязательного повышения квалификации для административно-технического персонала и специалистов ремонтных служб приводит к снижению уровня промышленной безопасности. Повышение квалификации должно проводиться не реже чем один раз в пять лет в организациях, имеющих лицензию на образовательную деятельность [16].

В соответствии с ГОСТ 25866–83 «Эксплуатация техники. Термины и определения», под технической эксплуатацией понимается часть эксплуатации, включающая транспортирование,

хранение, ТО и Р изделия. Определение ТО и Р дано в ГОСТ 18322–2016 «Система технического обслуживания и ремонта. Термины и определения», который заменил ГОСТ 18322–78. Определения ТО и Р, данные в указанных ГОСТах, расходятся с теми, которые даны в РД 31.1.02–04 [3]. Так, например, в данном документе, в частности, отмечается, что в перечень ТО-1 входят «все виды обслуживания с периодичностью менее месяца, а именно: ежесменное, ежесуточное, еженедельное» [3, п. 5.2], однако эти виды ТО не входят в перечень профилактических работ, указанных в перечне завода-изготовителя, содержащихся в ТО-1. Следует отметить, что в настоящее время ежесуточное и еженедельное обслуживание не проводятся, проводится только ежесменное обслуживание. В соответствии с п. 2.2.19 ГОСТ 18322–2016 под номерным ТО понимается ТО, при котором определенному объему работ присваивается свой порядковый номер. Также вызывают сомнение требования, предъявляемые при выполнении работ по ТО к докеру-механизатору. В настоящее время данная практика уже отменена на всех терминалах, а работы по ТО оборудования выполняет ремонтная служба терминала или аутсорсинговая организация [17].

Еще одним важным изменением в ГОСТ 18322–2016 является п. 2.2.24, в котором отмечается, что задержанное ТО — это ТО, которое может быть отсрочено в связи форс-мажорными обстоятельствами, даже если в соответствии с рекомендациями завода-изготовителя его необходимо провести. Это позволяет завершить обработку транспортных средств при погрузке / разгрузке.

В пп. 2.1.7 и 2.1.8 ГОСТ 18322–2016 дается понятие уровня разукрупнения ТО, который зависит от сложности перегрузочного оборудования, доступности его составных частей и квалификации персонала. В работе [18] приведена декомпозиция гидрофицированной перегрузочной машины ричстакера и влияние работоспособности отдельных узлов на ее работу в целом. Идентичную декомпозицию можно провести с большинством перегрузочного оборудования, имеющегося на терминале. В зависимости от технического состояния узлов ПТО, определяемого с помощью диагностического оборудования, и имеющейся статистики по времени наработки до ремонта определенного узла, можно определить порядок проведения регламентных работ по ТО и Р в «окнах», определяемых временем, когда оборудование не задействовано в работе. Это позволит частично решить вопрос резервирования ПТО и значительно повысить коэффициент технического использования ПТО [19].

В п. 5.11 РД 31.1.02–04 рассматриваются обязанности лица, ответственного за содержание ПТО в исправном состоянии. В Правилах [5] изменен уровень ответственности за техническое состояние ПТО, а именно вместо исправного состояния указано работоспособное, что, соответственно, изменяет степень ответственности данного специалиста. В этой связи важно учитывать профессиональные стандарты, введенные Министерством труда Российской Федерации, в том числе к сотрудникам, обслуживающим подъемные сооружения.

В 2017 г. вступил в действие ГОСТ 33715–2015 «Краны грузоподъемные. Съемные грузозахватные приспособления и тара. Эксплуатация». В этом ГОСТе установлены требования к безопасной эксплуатации и оценке работоспособности съемных грузозахватных приспособлений и грузовой тары, что должно обеспечить безопасность технологических процессов погрузочно-разгрузочных работ, выполняемых с применением грузоподъемных кранов. Данный ГОСТ введен впервые.

В приказе Ростехнадзора № 421 от 17.11.2016 [20] приведен перечень документов, требование которых является обязательным для каждой организации, эксплуатирующей опасный производственный объект, и выполнение которых контролируется органами надзора. В соответствии с Приказом Ростехнадзора № 37 от 29.01.2007 (зарегистрирован Минюстом России 22.03.2007, рег. № 9133) и изменениями Приказа № 251 от 30.06. 2015 г. [21] вводятся следующие документы: «Положение об организации работы по подготовке и аттестации специалистов организаций, поднадзорных Федеральной службе по экологическому, технологическому и атомному надзору» и «Положение об организации обучения и проверки знаний рабочих организаций, поднадзорных Федеральной службе по экологическому, технологическому и атомному надзору», в которых указывается, кем и как проводится предаттестационная подготовка сотрудников, работающих на опасных производственных объектах.

Выполнение работ по монтажу, экспертизе и ТО и Р, особенно на портальных кранах и контейнерных перегружателях, происходит на высоте, что, в соответствии с «Правилами по охране труда на высоте» [22], введенными в действие Приказом Министерства труда и социальной защиты РФ № 155н от 28 марта 2014 г., требует соблюдения следующих требований:

– повышение ответственности руководителей предприятий и расширение их полномочий по принятию решений относительно высотной деятельности;

– ужесточение требований к изготовителям средств индивидуальной защиты при работе на высоте, которые должны отвечать нормам технического регламента Таможенного союза [23];

– обеспечение надзора за назначением специалистов, отвечающих за безопасность;

– контроль проверок средств индивидуальной защиты, а также обязательных условий труда с ведением отчетной документации относительно предпринятых мер по обеспечению охраны труда при работе на высоте;

– введение обязательных требований к применению средств страховки и эвакуационных систем, предназначенных для обеспечения безопасности при работе на высоте.

Обсуждение (Discussion)

С введением Правил [5] и Федерального закона [15] отменены плановые проверки портов государственными инспекторами Ростехнадзора, что повысило ответственность руководителей организаций за промышленную безопасность и эксплуатацию перегрузочного оборудования. Введены новые профессиональные стандарты для сотрудников, обеспечивающих работоспособность перегрузочного оборудования и соблюдение требований промышленной безопасности. Все эти факторы должны быть отражены в ПТЭ.

Важное значение в экспорте нефтепродуктов имеют терминалы по перегрузке углеводородов, как нефтеналивные, так и для погрузки и приемки сжиженного природного газа. На таких терминалах установлено оборудование, служащее для погрузки / выгрузки. В РД 31.1.02–04 о таких терминалах даже не упоминается.

Следует учитывать и тот факт, что сейчас практически все порты Российской Федерации находятся под юрисдикцией Федерального агентства морского и речного транспорта (Росморречфлот). Другими словами, нет необходимости создавать правила отдельно для речного и для морского порта, в том числе «сухого» порта, где эксплуатируется техника, ничем не отличающаяся от техники, которая эксплуатируется в морском порту.

Выводы (Summary)

1. В настоящее время РД 31.1.02–04 [3] является действующим и необходимым документом, позволяющим при соблюдении всех указанных в нем положений обеспечить безаварийную работу перегрузочного оборудования морских торговых портов. Однако РД 31.1.02–04 не в полной мере учитывают положения, прописанные в новых нормативных документах [2] и [5]. При постоянном обновлении парка перегрузочного оборудования с современными системами диагностирования специалистам, работающим в порту, необходимо проходить не только проверку знаний в Ростехнадзоре, но и обязательно нужно повышать квалификацию с учетом новых технологий, методов работы оборудования и подходов к планированию работ по ТО и Р. Необходимо обеспечить распространение Правил [5] на все стивидорные компании, работающие в морских, речных, «сухих», рыбных портах, что позволит обеспечить единые требования к ПТЭ.

2. В связи с разночтениями в разных документах определения ТО необходимо привести всю терминологию к одному стандарту: ежесменное ТО, номерное ТО, сезонное ТО. Включить в Правила [5] разделы по технической эксплуатации нефтеналивных терминалов и терминалов (терминалы погрузки / выгрузки) по перегрузке сжиженных природных газов.

3. Необходимо учесть в Правилах [5] требования ГОСТ 33715–2015 «Краны грузоподъемные. Съемные грузозахватные приспособления и тара. Эксплуатация», который устанавливает требования к процессам эксплуатации съемных грузозахватных приспособлений и тары, а также

определяет порядок и методы оценки их работоспособности, включая периодичность и объем работ, браковочные показатели, а также требования к условиям проведения проверок и испытаний.

4. Следует добавить в Правила [5] требования, указанные в Приказе Ростехнадзора № 421 от 17.11.2016 [20], которые являются обязательными для каждой организации, эксплуатирующей опасный производственный объект.

5. Целесообразно рассмотреть возможность новой редакции РД 31.1.02–04, которая отражала бы современные требования законодательства и условия работы ПТО в портах и на транспортных терминалах.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Технический регламент Таможенного союза ТР ТС 010/2011 «О безопасности машин и оборудования». — СПб.: ЦОТПБСППО, 2014. — 60 с.

2. Федеральный закон № 116 (ред. от 07.03.2017) «О промышленной безопасности опасных производственных объектов» (с изм. и доп., вступ. в силу с 25.03.2017) [Электронный ресурс]. — Режим доступа: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_15234/6e24082b0e98e57a0d005f9c20016b1393e16 380/ (дата обращения: 12.11.2018).

3. РД 31.1.02–04. Правила технической эксплуатации подъемно-транспортного оборудования в морских торговых портах. — СПб.: ЗАО «ЦНИИМФ», 2004. — 425 с.

4. ПБ 10-382-00. Правила устройства и безопасной эксплуатации грузоподъемных кранов. — СПб.: Деан, 2004. — 269 с.

5. Правила безопасности опасных производственных объектов, на которых используются подъемные сооружения. — СПб.: ЦОТПБСППО, 2014. — 124 с.

6. *Дидманидзе О. Н.* Концепция технического сервиса по фактическому состоянию машин на основе оценки их параметрической надежности / О. Н. Дидманидзе, Д. В. Варнаков, В. В. Варнаков // Вестник Федерального государственного образовательного учреждения высшего профессионального образования Московский государственный агроинженерный университет им. В. П. Горячкина. — 2016. — № 2 (72). — С. 51–57.

7. *Амбарцумян А. А.* Анализ функциональности систем управления техническим обслуживанием и ремонтом оборудования / А. А. Амбарцумян, А. С. Хадеев // Проблемы управления. — 2005. — № 6. — С. 2–12.

8. *Озорнин С. П.* Совершенствование организации мониторинга изменений технического состояния машин в эксплуатации / С. П. Озорин, И. Е. Бердников // Вестник Забайкальского государственного университета. — 2014. — № 8 (111). — С. 64–69.

9. *Кизим А. В.* Обоснование необходимости автоматизации работ по ремонту и техническому обслуживанию оборудования / А. В. Кизим // Известия Волгоградского государственного технического университета. — 2009. — № 6 (54). — С. 118–121.

10. *Акланов Ф. А.* Автоматизация технического обслуживания и ремонта оборудования на производственных предприятиях / Ф. А. Акланов, П. В. Зеленков, Д. И. Ковалев, Ю. А. Нургалеева, О. О. Смирнов // Решетниковские чтения. — 2014. — Т. 2. — № 18. — С. 11–13.

11. *Манаков А. Л.* Создание системы мониторинга технического состояния транспортных и технологических машин / А. Л. Манаков, А. А. Игумнов, С. А. Коларж // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. — 2013. — № 4. — С. 125–132.

12. *Варнаков Д. В.* Теоретические основы концепции технического сервиса машин по фактическому состоянию на основе оценки их параметрической надежности / Д. В. Варнаков, О. Н. Дидманидзе // Аграрная наука Евро-Северо-Востока. — 2017. — № 2 (57). — С. 67–71.

13. *Панфилов О. А.* Расчет периодичности профилактических работ по техническому обслуживанию и ремонту (ТО и Р) и его реализации в PDM-системе / О. А. Панфилов // Информационные технологии в проектировании и производстве. — 2006. — № 1. — С. 36–41.

14. Федеральный закон «О внесении изменений в Федеральный закон «О промышленной безопасности опасных производственных объектов» [Электронный ресурс]. — Режим доступа: http://www.consultant.ru/cons/cgi/online.cgi?req=doc;base=PRJ;n=170174#03054424570026588 (дата обращения: 12.11.2018).

15. Федеральный закон от 04.03.2013 № 22-ФЗ «О внесении изменений в Федеральный закон «О промышленной безопасности опасных производственных объектов» [Электронный ресурс]. — Режим доступа: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_142907/ (дата обращения: 12.11.2018).

16. Основы государственной политики в области промышленной безопасности в Российской Федерации на период до 2025 года и на дальнейшую перспективу. Проект [Электронный ресурс]. — Режим доступа: http://www.gosnadzor.ru/public/discussion/2025/ (дата обращения: 12.11.2018).

17. *Зуб И. В.* Критерии выбора сервисной службы транспортного терминала / И. В. Зуб, Ю. Е. Ежов // Транспорт России: проблемы и перспективы – 2016: Материалы Международной научно-практической конференции. — СПб.: ИПТ РАН, 2016. — Т. 2. — С. 78–84.

18. *Зуб И. В.* Моделирование в задаче управления надежностью транспортных услуг контейнерного терминала / И. В. Зуб // Журнал Университета водных коммуникаций. — 2010. — № 3. — С. 76–79.

19. *Зуб И. В.* Работоспособность перегрузочной техники, как средство обеспечения функционирования транспортной логистической цепи / И. В. Зуб, Ю. Е. Ежов // Логистика: современные тенденции развития: материалы XVI Междунар. науч.-практ. конф. / ред. кол.: В. С. Лукинский (отв. ред.) и др. — СПб.: Изд-во ГУМРФ им. адм. С. О. Макарова, 2017. — С. 161–164.

20. Приказ Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору от 17 октября 2016 г. № 421 «Об утверждении перечней правовых актов, содержащих обязательные требования, соблюдение которых оценивается при проведении мероприятий по контролю в рамках осуществления видов государственного контроля (надзора), отнесенных к компетенции Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору» [Электронный ресурс]. — Режим доступа: http://cntr-nrs.gosnadzor.ru/news/65/214/ (дата обращения: 12.11.2018).

21. Приказ от 30 июня 2015 г. № 251 «О внесении изменений в положение об организации обучения и проверки знаний рабочих организаций, поднадзорных Федеральной службе по экологическому, технологическому и атомному надзору, утвержденное Приказом Федеральной службе по экологическому, технологическому и атомному надзору от 29 января 2007г. № 37 [Электронный ресурс]. — Режим доступа: http://www.garant.ru/products/ipo/prime/doc/71049084/ (дата обращения: 12.11.2018).

22. Правила по охране труда при работе на высоте. — 2-е изд., испр. — М.: ЗАО НТЦ ПБ, 2015. — 132 с.

23. ТР ТС 019/2011. Технический регламент таможенного союза «О безопасности средств индивидуальной защиты». — М.: ЭНАС, 2017. — 89 с.

REFERENCES

1. Russian Federation. Technical Regulations of the Customs Union TR TS 010/2011. «O bezopasnosti mashin i oborudovaniya». SPb.: TsOTPBSPPO, 2014.

2. Federal'nyi zakon № 116 (red. ot 07.03.2017) «O promyshlennoi bezopasnosti opasnykh proizvodstvennykh ob"ektov» (s izm. i dop., vstup. v silu s 25.03.2017).Web. 12. Nov. 2018 <http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_15234/6e24082b0e98e57a0d005f9c20016b1393e16 380/>.

3. Russian Federation. Working documentation RD 31.1.02-04. Pravila tekhnicheskoi ekspluatatsii pod"emnotransportnogo oborudovaniya v morskikh torgovykh portakh. SPb.: ZAO «TsNIIMF», 2004.

4. Russian Federation. Safety regulations PB 10-382-00. Pravila ustroistva i bezopasnoi ekspluatatsii gruzopod"emnykh kranov. SPb.: Dean, 2004.

5. *Pravila bezopasnosti opasnykh proizvodstvennykh ob"ektov, na kotorykh ispol'zuyutsya pod"emnye sooruzheniya*. SPb.: TsOTPBSPPO, 2014.

6. Didmanidze, Otari N., Dmitry V. Varnakov, and Valery V. Varnakov. "Concept of machinery maintenance based on machinery performance by assessing its parametrical reliability." *Vestnik of the Federal state educational institution of higher professional education "Moscow State Agroengineering University named after V. P. Goryachkin"* 2(72) (2016): 51–57.

7. Ambartsumian, A.A., and A.S. Khadeev. "Functionality analysis of equipment maintenance management systems." *Problemy Upravleniya* 6 (2005): 2–12.

8. Ozornin, Sergey, and Iliya Berdnikov. "Improvement of Monitoring Changes' Organization of the Technical State of Machines in Operation." *Vestnik Zabaikal'skogo gosudarstvennogo universiteta* 8(111) (2014): 64–69.

9. Kizim, A. V. "Equipment maintenance automation necessity reasoning." *Izvestiya Volgogradskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* 6(54) (2009): 118–121.

10. Aklanov, F. A., P. V. Zelenkov, D. I. Kovalev, Y. A. Nurgaleeva, and O. O. Smirnov. "Automation of maintenance and repair of equipment at manufacturing enterprises." *Reshetnikovskie chteniya* 2.18 (2014): 11–13.

11. Manakov, A. L., A. A. Igumnov, and S. A. Kolarzh. "Monitoring technical state of transportation vehicles and production machines." *Journal of Mining Science* 49.4 (2013): 630–636. DOI: 10.1134/S1062739149040151.

12. Varnakov, D. V., and O. N. Didmanidze. "Theoretical basis of the concept for technical service of machines on actual state based on assessed parametric reliability." *An Agrarian Science of Euro-North-East* 2(57) (2017): 67–71.

13. Panfilov, O. A. "Raschet periodichnosti profilakticheskikh rabot po tekhnicheskomu obsluzhivaniyu i remontu (TOiR) i ego realizatsii v PDM-sisteme." *Informatsionnye tekhnologii v proektirovanii i proizvodstve* 1 (2006): 36–41.

14. Federal'nyi zakon «O vnesenii izmenenii v Federal'nyi zakon «O promyshlennoi bezopasnosti opasnykh proizvodstvennykh ob"ektov». Web. 12 Nov. 2018 <http://www.consultant.ru/cons/cgi/online.cgi?req=doc;base=PRJ;n=170174#03054424570026588>.

15. Federal'nyi zakon ot 04.03.2013 № 22-FZ «O vnesenii izmenenii v Federal'nyi zakon «O promyshlennoi bezopasnosti opasnykh proizvodstvennykh ob"ektov». Web. 12 Nov. 2018 <http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_142907/>.

16. Osnovy gosudarstvennoi politiki v oblasti promyshlennoi bezopasnosti v Rossiiskoi Federatsii na period do 2025 goda i na dal'neishuyu perspektivu. Proekt. Web. 12 Nov. 2018 <http://www.gosnadzor.ru/public/discussion/2025/>.

17. Zub, I. V., and Yu. E. Ezhov. "Criteria for selection of service transport terminal." *Transport Rossii: problemy i perspektivy – 2016: Materialy Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii*. Vol. 2. SPb.: IPT RAN, 2016. 78–84.

18. Zub, I. V. "Modeling in problem of management of reliability of transport service of container terminal." *Zhurnal Universiteta vodnykh kommunikatsii* 3 (2010): 76–79.

19. Zub, I. V., and Yu. E. Ezhov. "Rabotosposobnost' peregruzochnoi tekhniki, kak sredstvo obespecheniya funktsionirovaniya transportnoi logisticheskoi tsepi." *Logistika: sovremennye tendentsii razvitiya: materialy XVI Mezhdunarodnaya nauch.-prakt. konf.* Edited by V. S. Lukinskii, et al. SPb.: Izd-vo GUMRF im. adm. S. O. Makarova, 2017. 161–164.

20. Prikaz Federal'noi sluzhby po ekologicheskomu, tekhnologicheskomu i atomnomu nadzoru ot 17 oktyabrya 2016 g. № 421 «Ob utverzhdenii perechnei pravovykh aktov, soderzhashchikh obyazatel'nye trebovaniya, soblyudenie kotorykh otsenivaetsya pri provedenii meropriyatii po kontrolyu v ramkakh osushchestvleniya vidov gosudarstvennogo kontrolya (nadzora), otnesennykh k kompetentsii Federal'noi sluzhby po ekologicheskomu, tekhnologicheskomu i atomnomu nadzoru». Web. 12 Nov. 2018 <http://cntr-nrs.gosnadzor.ru/news/65/214/>.

21. Prikaz ot 30 iyunya 2015 g. № 251 «O vnesenii izmenenii v polozhenie ob organizatsii obucheniya i proverki znanii rabochikh organizatsii, podnadzornykh Federal'noi sluzhbe po ekologicheskomu, tekhnologicheskomu i atomnomu nadzoru, utverzhdennoe Prikazom Federal'noi sluzhbe po ekologicheskomu, tekhnologicheskomu i atomnomu nadzoru ot 29 yanvarya 2007g. № 37. Web. 12 Nov. 2018 <http://www.garant.ru/products/ipo/prime/doc/71049084/>.

22. *Pravila po okhrane truda pri rabote na vysote.* 2-e izd., ispr. M.: ZAO NTTs PB, 2015.

23. Russian Federation. Technical Regulations of the Customs Union TR TS 019/2011 «O bezopasnosti sredstv individual'noi zashchity». M.: ENAS, 2017.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ	INFORMATION ABOUT THE AUTHORS
Зуб Игорь Васильевич — кандидат технических наук ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова» 198035, Российская Федерация, Санкт-Петербург, ул. Двинская, 5/7 e-mail: *zubiv@gumrf.ru*	**Zub, Igor V.** — PhD Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping 5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg, 198035, Russian Federation e-mail: *zubiv@gumrf.ru*
Ежов Юрий Евгеньевич — кандидат технических наук, профессор ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова» 198035, Российская Федерация, Санкт-Петербург, ул. Двинская, 5/7 e-mail: *ezhovye@gumrf.ru*	**Ezhov, Yurii E.** — PhD, professor Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping 5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg, 198035, Russian Federation e-mail: *ezhovye@gumrf.ru*

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

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

Статья поступила в редакцию 15 ноября 2018 г.
Received: November 15, 2018.

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

DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-6-1162-1178

SEA TRANSPORTATION OF DIRECT REDUCED IRON IN BULK

A. N. Sitov[1], V. A. Malovechko[2], A. E. Slitsan[1]

[1] — Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping,
St. Petersburg, Russian Federation
[2] — Marine Cargo Bureau, St. Petersburg, Russian Federation

The International code of sea transportation of bulk cargoes for definition of a class of danger of bulk cargoes does not take a number of the interconnected factors (size of a congestion and dispersion of a material, temperature, humidity and others), that leads to a biased assessment of degree of danger of freight into account. Dangerous processes of self-heating with transition to self-ignition, allocation of dangerous gases and oxygen absorption can happen consistently or in parallel. The code does not contain requirements and the techniques, allowing to determine criteria and parameters of the sizes of a congestion of a material by size, conditions of environment for danger emergence. For definition of a class of danger of a bulk cargo it is necessary to investigate its heatphysical characteristics and kinetic parameters of process of self-ignition. Data on heatphysical characteristics of materials have to be provided by the consignor without fail with the instruction them in the Material Safety Data Sheet. Heatphysical models of spontaneous emergence of burning, on the basis of which methods of determination of kinetic parameters of process of self-ignition are developed and approved in practice, are investigated. The mathematical description of the heatphysical model describing process of thermal self-ignition is given. Skilled values of kinetic parameters of process of self-ignition are presented and the forecast for values of fireproof technological parameters of warehousing in ports and transportations on vessels is executed. Practical recommendations for change the regulations of bulk cargo transportation on the example of direct reduced iron are given. It is offered to limit height of a stack of bulk cargo depending on duration of transportation and temperatures. Change of technological rules in transit and storage of cargoes will allow to increase fire safety of transport operations considerably.

Keywords: dangerous cargo, bulk cargo, self-ignition, technology of transportation, safety.

For citation:
Sitov, Alexandr N., Vladimir A. Malovechko, and Andrey E. Slitsan. "Sea transportation of direct reduced iron in bulk." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova* 10.6 (2018): 1162–1178. DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-6-1162-1178.

УДК 656.613.1

МОРСКАЯ ПЕРЕВОЗКА ЖЕЛЕЗА ПРЯМОГО ВОССТАНОВЛЕНИЯ НАВАЛОМ

А. Н. Ситов[1], В. А. Маловечко[2], А. Е. Слицан[1]

[1] — ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова»,
Санкт-Петербург, Российская Федерация
[2] — ООО «Морское грузовое бюро», Санкт-Петербург, Российская Федерация

Международный кодекс морской перевозки навалочных грузов для определения класса их опасности не принимает во внимание ряд взаимосвязанных факторов (размер скопления и дисперсность материала, температуру, влажность и др.), что приводит к необъективной оценке степени опасности груза. Опасные процессы самонагревания с переходом к самовозгоранию, выделение опасных газов и поглощение кислорода для рассматриваемых грузов может происходить либо последовательно, либо параллельно. Кодекс не содержит требований и методик, позволяющих определять критерии и параметры размеров скопления материала по величине, условий окружающей среды для возникновения опасности. Для определения класса опасности навалочного груза необходимо исследовать его теплофизические характеристики и кинетические параметры процесса самовозгорания. Сведения о теплофизических характеристиках материалов должны предоставляться грузоотправителем в обязательном порядке с указанием их в паспорте безопасности химической продукции. Исследованы теплофизические модели самопроизвольного возникновения горения, на основе которых разработаны и апробированы на практике методы определения кинетических параметров процесса самовозгорания. Дано математическое описание теплофизической модели, описы-

вающей процесс теплового самовозгорания. Представлены опытные значения кинетических параметров процесса самовозгорания и выполнен прогноз значений пожаробезопасных технологических параметров складирования в портах и перевозки на судах. Предложены практические рекомендации по изменению нормативных актов, регламентирующих перевозку навалочных грузов на примере железа прямого восстановления. Предлагается ограничить высоту перевозимого навалом штабеля груза в зависимости от длительности перевозки и температуры. Отмечается, что изменение технологических правил при перевозке и хранении грузов позволит значительно повысить пожаробезопасность транспортных операций.

Ключевые слова: опасный груз, навалочный груз, самовозгорание, технология перевозки, безопасность.

Для цитирования:
Ситов А. Н. Морская перевозка железа прямого восстановления навалом / А. Н. Ситов, В. А. Маловечко, А. Е. Слицан // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2018. — Т. 10. — № 6. — С. 1162–1178. DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-6-1162-1178.

Введение (Introduction)

Международная ассоциация владельцев сухогрузных судов (далее — ИНТЕРКАРГО) уделяет значительное внимание вопросам безопасности перевозки навалочных грузов (НГ) с особыми условиями. В качестве основных причин аварий, происходящих с судами, являются предоставление недостоверных сведений о свойствах груза, а также нарушение технологических требований к условиям погрузки, перевозки и хранения [1].

В целях повышения безопасности перевозок НГ Международная морская организация (IMO) приняла ряд поправок к международным кодексам, в том числе к Международному кодексу морской перевозки навалочных грузов (далее — МКМПНГ) [2], [3], которые, по-прежнему, не являются исчерпывающими для грузов, подверженных самовозгоранию и выделению опасных газов при взаимодействии с водой. В МКМПНГ приведены двадцать две индивидуальных описи для грузов класса ООН МНВ. Большинство этих грузов не отнесены к подклассам 4.2 (вещества, способные к самовозгоранию) или 4.3 (вещества, выделяющие легко воспламеняющиеся газы при соприкосновении с водой), но проявляют опасные свойства в силу своих физико-химических характеристик при определенных взаимосвязанных условиях, к которым относятся:

– размер скопления материала и его геометрическая форма;

– дисперсность материала;

– температура и влажность окружающей среды;

– температура и влажность материала, наличие в нем примесей (жир, масло, нефтепродукты и др.);

– продолжительность влияния параметров окружающей среды на скопление материала известного размера и теплофизических характеристик;

– продолжительность пребывания скопления материала известного размера и теплофизических характеристик в среде с заданными параметрами (температура, влажность, газовый состав).

МКМПНГ для определения класса опасности НГ не принимает во внимание указанные ранее факторы и их взаимное влияние, что приводит к необъективной оценке степени опасности груза. Следует также отметить, что опасные процессы самонагревания с переходом к самовозгоранию, выделение опасных газов и поглощение кислорода для рассматриваемых грузов могут происходить либо последовательно, либо параллельно. МКМПНГ не содержит требований и методик, позволяющих определять критерии и параметры размеров скопления материала по величине, а также условий окружающей среды, способствующих возникновению опасности.

Задачей исследования является определение безопасных технологических параметров морской перевозки железа прямого восстановления в зависимости от физико-химических свойства материала, его теплофизических характеристик и кинетических параметров процесса самовозгорания.

Методы и материалы (Methods and Materials)

Навалочные грузы, склонные к самонагреванию — это твердые сыпучие и волокнистые материалы органической и / или неорганической природы с кинетически неоднородными поверхностями. Их самонагревание, как правило, инициируется наличием влаги и / или примесей. При отсутствии теплоотвода от скопления груза из зоны с повышенной температурой скорость самонагревания возрастает, формируется очаг самовозгорания и начинается процесс окисления, который завершается гетерогенным горением (тлением).

Исследованы теплофизические модели самопроизвольного возникновения горения, на основе которых разработаны и апробированы на практике методы определения кинетических параметров процесса самовозгорания [4]. Выполним краткое математическое описание теплофизической модели, с помощью которой осуществляется прогноз условий теплового самовозгорания.

Критические условия самовозгорания определяются равенством:

$$\frac{E}{RT_{\text{в}}^2} Ce^{\frac{-E}{RT_{\text{в}}}} = m_{\text{ох}}, \tag{1}$$

где E — энергия активации, Дж/моль;

C — предэкспоненциальный множитель адиабатической скорости самонагревания, К/с;

R = 8,314 — универсальная константа, равная произведению константы Больцмана на число Авогадро, Дж/(моль·К);

$T_{\text{в}}$ — критическая температура самовозгорания материала, К;

e — основание натурального логарифма;

$m_{\text{ох}}$ — параметр (темп) охлаждения, с$^{-1}$.

Левая часть равенства (1) является производной адиабатической скорости самонагревания P_+ по температуре (темпом самонагревания) при критической температуре $T_{\text{в}}$:

$$m_E = P'_+\big|_{T_{\text{в}}} = \frac{E}{RT_{\text{в}}^2} Ce^{-E/R\cdot T_{\text{в}}}. \tag{2}$$

При неподвижном скоплении самонагревающегося материала темп охлаждения описывается формулой

$$m_{\text{ох}} = \frac{\Psi \alpha F}{c_p \rho V}, \tag{3}$$

где Ψ — критерий неравномерности нагрева;

α — коэффициент теплоотдачи, Вт/(м^2·К);

c_p — удельная теплоемкость материала, Дж/(кг·К);

ρ — насыпная плотность, кг/м^3;

F — площадь поверхности скопления материала, м^2;

V — объем скопления материала, м^3.

Критическая для самовозгорания температура окружающей среды $T_{\text{о}}$ связана с температурой $T_{\text{в}}$ соотношением

$$T_{\text{о}} = T_{\text{в}} - \frac{RT_{\text{в}}^2}{E}. \tag{4}$$

Используя зависимость (4), можно определить $T_{\text{в}}$,

$$T_{\text{в}} = \frac{1}{2}\left(\frac{E}{R} - \sqrt{\frac{E^2}{R^2} - \frac{4ET_{\text{о}}}{R}}\right). \tag{5}$$

Критерий неравномерности нагрева определяется по формуле

$$\Psi = \frac{n\lambda}{\alpha R_x + n\lambda}, \tag{6}$$

где n — относительный температурный градиент;

λ — коэффициент теплопроводности, Вт/(м·К);

R_x — определяющий размер скопления, м;

α — коэффициент теплоотдачи, Вт / (м^2 ·К).

Подставив значения m_{ox} и Ψ в формулу (1), получим определяющий размер скопления R_x:

$$R_x = -\frac{n\lambda}{2\alpha} + \sqrt{\left(\frac{n\lambda}{2\alpha}\right)^2 + \frac{in\lambda}{m_E c_p \rho}}, \quad (7)$$

где $i = FR_xV^1$ — коэффициенты формы скопления материала (1, 2, 3 — для плоскости, цилиндра и шара соответственно).

Время до начала самовозгорания скопления материала при хранении на причале или при транспортировке в трюме судна может быть определено по формуле

$$\tau = \frac{RT_н^2}{C\left(E - RT_н\right)} e^{E/R\cdot T_н} \approx \frac{RT_o^2}{CE} e^{E/RT_o}, \quad (8)$$

где $T_н$ — начальная температура материала, К.

Энергия активации E и предэкспоненциальный множитель C связаны между собой изопараметрическим компенсационным уравнением

$$E = \hat{E} + RT_C(\ln C - \ln \hat{C}), \quad (9)$$

где $\hat{E}$ — изокинетическая энергия активации (примерно равна 22000 Дж/моль);

$\hat{C}$ — изокинетический предэкспонент (примерно равен 10 К/с);

T_C — температура компенсации, К.

Для определения значения предэкспоненциального множителя используем формулу

$$C = \exp\left(\ln \hat{C} + \frac{E - \hat{E}}{RT_c}\right). \quad (10)$$

Условия самовозгорания НГ определяются совокупностью следующих факторов:

– температуры материала и окружающей среды;

– кинетических параметров процесса самонагревания (E, C и T_c);

– теплофизических свойств самовозгорающихся материалов: теплопроводности, удельной теплоемкости, насыпной плотности;

– геометрических размеров и формы скопления материала;

– условий теплообмена самонагревающейся массы с окружающей средой (коэффициента теплоотдачи).

Таким образом, в случае использования самовозгорающихся материалов МНВ (SH), самовозгорание которых инициируется влагой и / или примесями и сопровождается выделением газов (МНВ (WF) и МНВ (WT)), должны быть известны их теплофизические характеристики: коэффициент теплопроводности, коэффициент теплоотдачи, удельная теплоемкость, насыпная плотность.

Для определения кинетических параметров процесса самовозгорания (E, C и T_c) необходимы экспериментальные исследования для измерения темпа охлаждения и определения величины разогрева относительно заданной температуры термостатирования в суховоздушном термостате ΔT для нескольких, разных по массе и размерам, образцов груза. Полученный массив экспериментальных значений используется для построения графика зависимости адиабатической скорости самонагревания от температуры (рис. 1) и описывается уравнением

$$\ln P_+ = \ln C - E/\left(RT\right). \quad (11)$$

Энергия активации может быть определена по формуле

$$E = \frac{R\left(\ln P_{+,1} - \ln P_{+,2}\right)\cdot 10^3}{10^3/T_{M,2} - 10^3/T_{M,1}}. \quad (12)$$

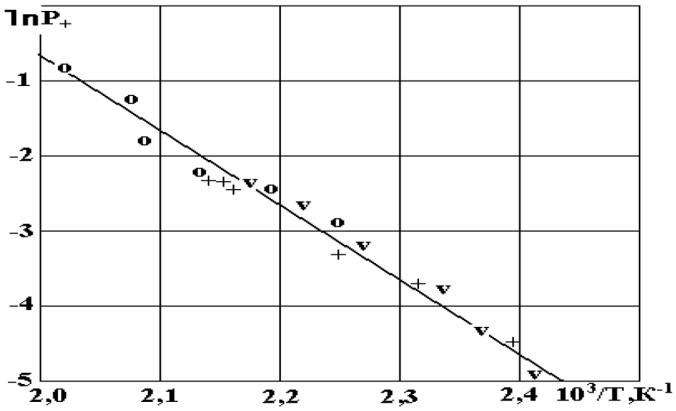


Рис. 1. Положение на общем графике экспериментальных точек, полученных по кривым «разогрев – время» при определении ΔT (*v* — в стадии самонагревания; о — при самовозгорании; + — по максимальным разогревам)

Значения $\ln P_+$ определяются по точкам на прямой, а не по фактическим экспериментальным точкам. Использование формул (9) и (11) позволяет определить кинетические параметры процесса самовозгорания. Наличие формализованной теплофизической модели дает возможность прогнозировать процесс самовозгорания МНВ (SH) по имеющемся кинетическим параметрам и значениям теплофизических характеристик груза.

Сведения о теплофизических характеристиках материалов, по мнению авторов, должны предоставляться грузоотправителем в обязательном порядке с указанием их в паспорте безопасности химической продукции и MSDS. При отсутствии сведений о теплофизических значениях прогнозирование также возможно, но по результатам определения температурных условий теплового самовозгорания — экспериментально выявленных зависимостей между температурой окружающей среды, объемом (массой) скопления груза и временем до момента его самовозгорания.

Сущность данного метода состоит в определении температуры самовозгорания образца груза, помещенного в сетчатом контейнере заданного размера в суховоздушном термостате. В процессе испытаний определяется минимальная температура, при которой образец самовозгорается, а при температуре на пять градусов ниже этой температуры самовозгорания не происходит. Обработка опытных данных состоит в построении графиков зависимости логарифма температуры самовозгорания (рис. 2, *а*) от логарифма характерного размера контейнера и от логарифма времени до самовозгорания (рис. 2, *б*).

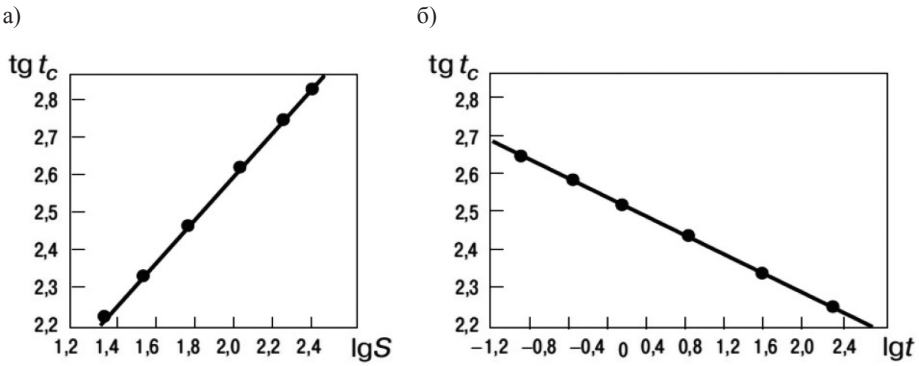


Рис. 2. Зависимость условий теплового самовозгорания от удельной поверхности (*а*) и времени до самовозгорания (*б*)

Для прогноза могут использоваться как графики, так и формулы. По известной температуре груза (желательно в геометрическом центре скопления) можно рассчитать и установить

безопасный размер скопления (штабеля) и период его хранения (транспортировки) при этой температуре. И, наоборот, для установленного размера скопления (штабеля) и продолжительности его хранения (транспортировки) при контроле температуры груза можно прогнозировать возникновение опасности самовозгорания. Однако подобный прогноз, по сравнению с прогнозом по кинетическим параметрам, будет приблизительным, а иногда и ошибочным (особенно для низких и отрицательных температур окружающей среды). Причина возможных ошибок состоит в том, что в интерпретации результатов испытаний твердых дисперсных материалов на склонность их к самовозгоранию не учтено значительное изменение условий теплоотдачи от ламинарного режима теплообмена к турбулентному, сопровождающее самонагревание больших объемов груза. В результате могут возникать существенные ошибки в определении условий самовозгорания реальных судовых партий МНВ (SH) при их формировании в порту и перевозке на судах.

Результаты (Results)

Для апробации теплофизической модели самопроизвольного возникновения горения и определения кинетических параметров процесса самовозгорания твердых дисперсных материалов исследовались образцы некоторых аналогов НГ, характеристики которых приведены в табл. 1.

Таблица 1

Характеристика исследованных образцов аналогов НГ

Наименование образца	Массовая доля компонентов, %			Теплофизические параметры			
	Белок	Жир	Влага	Коэффициент теплопроводности, Вт / (м·К)	Удельная теплоемкость, Дж/(кг·К);	Насыпная плотность, кг/м^3	Принятое значение коэффициента теплоотдачи, Вт/(м^2·К)
Рыбная мука (ГОСТ 2716–82)	66,3	3,8	8,4	0,1	1500	670	11
Торф верховой низкой степени разложения (ГОСТ Р 51213–98)	–	–	53,0	0,1	1960	200	11
Жмых копры (Индонезия)	20,8	13,4	8,5	0,16	2350	540	11
Жмых копры (Филиппины)	17,5	16,4	8,1	0,16	2350	540	11
Уголь бурый (ГОСТ 32464–2013)	–	–	12,1	0,22	1720	560	11

Для определения темпа охлаждения испытуемой «навески» каждого образца НГ и ее разогревов использовались сетчатые цилиндрические контейнеры типа К-15 и К-30, причем для контейнеров К-15 выполнялось шесть–восемь разогревов, для К-30 — два-три разогрева. Термостатирование в суховоздушном термостате осуществлялось в интервале температур 135–235 °С.

По определенным экспериментальным значениям $m_{ox,i}$ и величине разогревов ΔT были получены зависимости адиабатической скорости самонагревания от температуры для образцов НГ (рис. 3). Расчет энергии активации E осуществлялся с использованием уравнения (12), предэкспонента C — с использованием уравнения (10).

Средние значения результатов вычисления кинетических параметров процесса самовозгорания исследованных материалов приведены в табл. 2.

Таблица 2

Кинетические параметры процесса самовозгорания образцов навалочных грузов

Наименование груза	Кинетические параметры		
	E, Дж/моль	C, К/с	T_c, К
Рыбная мука	54000	$2{,}5 \cdot 10^4$	492
Торф	55000	$2{,}3 \cdot 10^4$	511
Жмых копры (Индонезия)	94000	$1{,}3 \cdot 10^9$	464
Жмых копры (Филиппины)	94000	$4{,}0 \cdot 10^7$	483
Уголь бурый	94000	$1{,}0 \cdot 10^8$	432

Полученные значения кинетических параметров процесса самосогревания могут быть использованы для прогнозирования основных параметров безопасной перевозки груза: допустимого размера скопления НГ, периода безопасности с точки зрения его самовозгорания при заданной температуре окружающей среды (период индукции), критических значений разогрева и температуры материала.

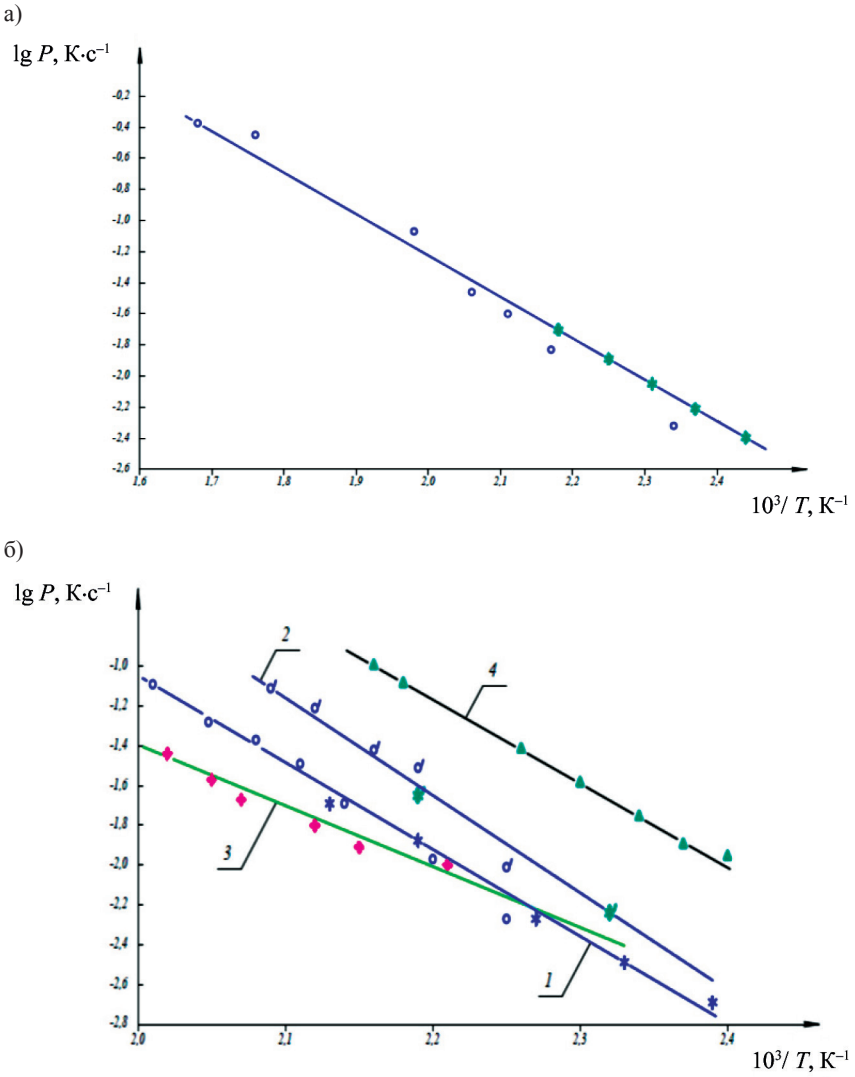


Рис. 3. Температурные зависимости адиабатической скорости самонагревания:
а — для рыбной муки; *б* — для образцов навалочных грузов
Условные обозначения: 1 — жмых копры (Филиппины); *2* — жмых копры (Индонезия);
3 — торф верховой низкой степени разложения; *4* — бурый уголь

Результаты прогнозирования с использованием теплофизических параметров для критического значения размера штабеля $X_{кр}$ и периода индукции τ приведены в табл. 3. Там же указано прогнозируемое значение опасного разогрева ΔT груза для реальных температур окружающей среды при хранении и транспортировке. Анализ приведенных в табл. 3 результатов позволяет сделать вывод о целесообразности и возможности перевозки груза навалом.

Таблица 3

Прогноз влияния температуры окружающей среды на размер скопления груза и время до образования очага его самовозгорания

Температура окружающей среды, К (°С)	Критическая высота скопления цилиндрической формы, м	Время до самовозгорания, сут	Критический разогрев, К
Рыбная мука			
273 (0)	3,450	119,3	–
293 (20)	1,635	27,2	–
313 (40)	0,853	7,5	16,7
333 (60)	0,478	2,5	–
Торф			
273 (0)	4,84	91,2	–
293 (20)	2,40	22,9	–
313 (40)	1,30	6,93	17,4
333 (60)	0,76	2,44	–
Жмых копры (Индонезия)			
273 (0)	87,4	Безопасно в течение длительного периода времени	
293 (20)	22,76		
313 (40)	7,06	393	9,2
333 (60)	2,52	51	–
Жмых копры (Филиппины)			
273 (0)	46,88	Безопасно в течение длительного периода времени	
293 (20)	14,40		
313 (40)	5,16	210	10,5
333 (60)	2,10	35	–
Бурый уголь			
273 (0)	5,33	Безопасно в течение длительного периода времени	
293 (20)	1,72	189	–
313 (40)	0,64	26,5	17,4
333 (60)	0,26	4,75	–

Для рассмотренных ранее грузов их безопасная перевозка навалом допустима при соблюдении следующих условий:

– для жмыха копры: высота бурта в трюме не превышает 7 м, если температура окружающей среды в течение рейса не будет превышать 40 °С;

– для торфа: высота бурта в трюме не превышает 5 м, если температура окружающей среды в рейсе продолжительностью не более 20 сут не будет превышать 20 °С.

Применение рассмотренных моделей на практике целесообразно при перевозке железа прямого восстановления (далее — ЖПВ). В России ЖПВ производят в форме окатышей и брикетов, в том числе отсевов разных фракций [5], [6]–[13]. Подобный груз имеет обобщающее наименование «Металлизованная продукция».

При определении темпа охлаждения используется термографическая установка. Контейнер с анализируемым материалом или монолитный образец предварительно нагревают в сушильном шкафу до температуры 130–140 °С, затем помещают в холодный термостат, обеспечивая ввод термодатчика в геометрический центр образца. Самописец записывает кривые охлаждения до тех пор, пока температура образца не примет значение температуры воздуха в термостате (рис. 4). Нагретое тело не имеет внутренних источников тепла, поэтому превышение его температуры $T_в$ над температурой окружающей среды $T_о$ с течением времени изменяется по экспоненциальному закону:

$$\Delta T = T_в - T_о = \Delta T_{нач}\, e^{-m\tau}, \qquad (13)$$

где $\Delta T_{нач}$ — начальная разность температур, К, в момент времени $\tau = 0$;

m — темп охлаждения, $с^{-1}$.

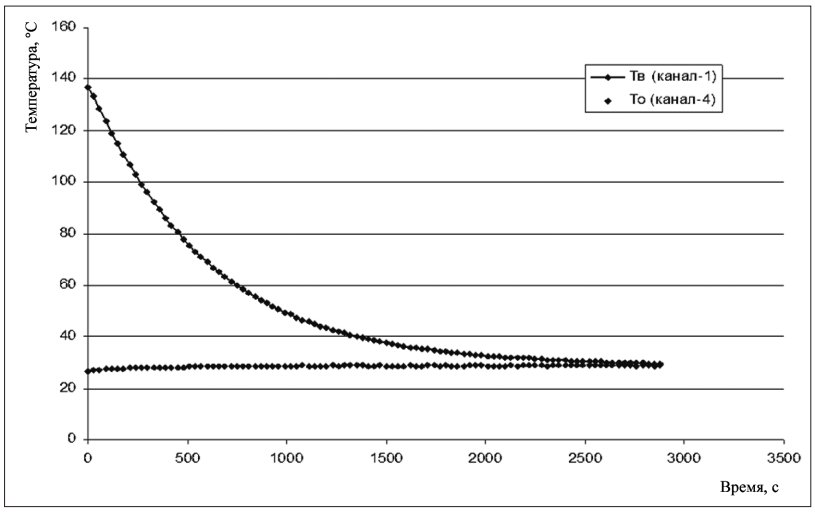


Рис. 4. Термограмма охлаждения нагретого образца в камере суховоздушного термостата

Координаты точек, полученных в результате логарифмирования текущих значений разности $T_в$ и T_0, наносятся на график зависимости $\ln \Delta T$ от τ (рис. 5). При прогнозировании следует рассматривать только прямолинейный участок графика, так как его начальная часть искажена и соответствует нерегулярной (переходной) фазе, вызванной переносом исследуемого образца из горячего сушильного шкафа в холодный термостат, а конечная — выравниванию температур образца и окружающей среды, а также увеличению погрешности измерений.

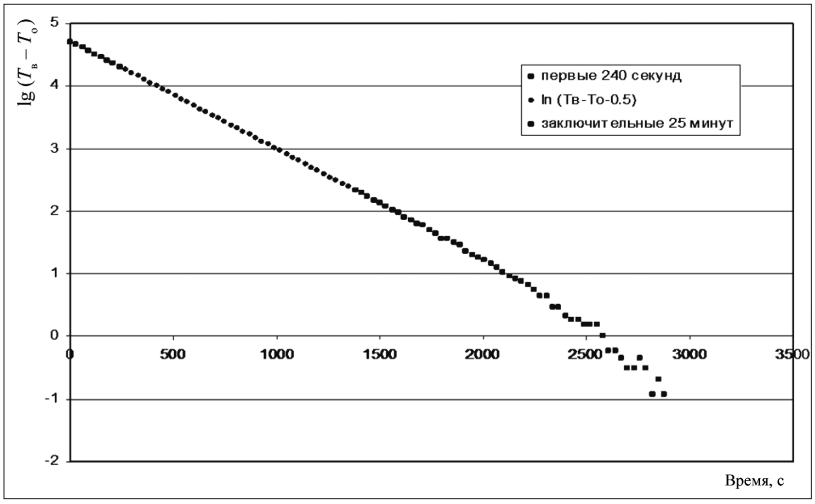


Рис. 5. График зависимости логарифма разности температур ($T_в - T_о$) от времени

Полученный график описывается линейной зависимостью с коэффициентами A_0 и A_1:

$$\ln \Delta T = \ln \Delta T_{\text{нач}} - m\tau, \tag{14}$$

где A_0 — свободный член линейной зависимости, равный $\ln \Delta T_{\text{нач}}$, К;

A_1 — коэффициент полинома первой степени (тангенс угла наклона прямой), равный m, $с^{-1}$).

Коэффициент A_1, а значит, и искомый темп охлаждения m могут быть определены методом наименьших квадратов. Численные значения темпов охлаждения для испытанных образцов брикетов ЖПВ, которые приведены в табл. 4, используются в расчете адиабатической скорости самонагревания при $P_- = P_+$.

Зависимость скорости самонагревания от температуры описывается уравнением

$$P_+ = ce^{-E/RT}, \tag{15}$$

где E — энергия активации, Дж/моль; c — предэкспонента скорости реакции, К/с; T — температура, К.

На основе результатов, проведенных экспериментов по определению величины разогревов для различных размеров образцов материала, получены термограммы «разогрев – время» для монолитного (рис. 6) и сыпучего образцов (рис. 7).

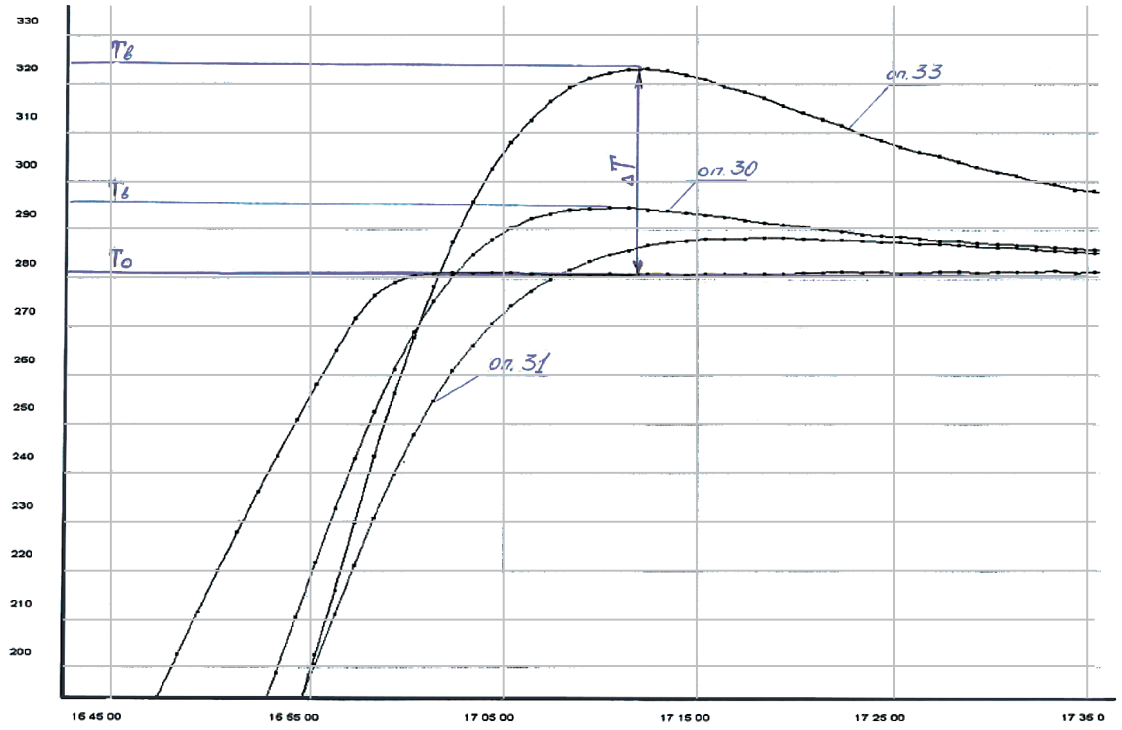


Рис. 6. Термограмма самонагревания образцов 1/4 от целого брикета при $T_0 = (280 \pm 1)°$

В момент достижения максимальной температуры скорость самонагревания равна скорости теплоотвода:

$$P_- = P_+. \tag{16}$$

Эта зависимость может быть представлена в ином виде:

$$m(T_в - T_о) + P_+. \tag{17}$$

Использование уравнения (17) позволяет определить скорость самонагревания P_+ в зависимости от темпа охлаждения образца и разности температур в центре образца и окружающей среды.

Таблица 4

Исходные данные определения разогревов и результаты обработки зависимости скорости самонагревания от температуры методом наименьших квадратов для брикетов

Номер образца	Характеристика образца и его масса	Температура в термостате, T_o, °C / K	Температура в центре образца, $T_в = T_o + \Delta T$, K	Разогрев, ΔT, K	Темп охлаждения, m, 1/c	Адиабатическая скорость самонагревания, $P = m\Delta T$, K/c	X, 1000 /$T_в$	Y, -ln P	Y_a, $A_0 + A_1X$	Ошибка аппроксимации		Смесь Ya,	Ошибка аппроксимации	
										абс.	%	$A_0 + A_1X$	абс.	%
MIDREX														
М-1	Брикет целый (599,1 г)	230/503	509	6	0,001353	8,118E-03	1,965	4,814	5,030562	–0,21689	4,51	5,006342	–0,19267	4,00
М-2	Брикет целый (591,2 г)	250/523	533	10	0,001437	1,437E-02	1,876	4,243	4,341282	–0,09867	2,33	4,346405	–0,10379	2,45
М-3	½ брикета (344,3 г; 344,8 г; 368,2 г)	250/523	533	10	0,001229	1,229E-02	1,876	4,399	4,341282	0,057687	1,31	4,346405	0,052564	1,19
М-4	½ брикета (305,3 г; 263,8 г)	260/533	549	16	0,001229	1,966E-02	1,821	3,929	3,915243	0,013723	0,35	3,938503	–0,00954	0,24
М-5	½ брикета (272,3 г)	270/543	563	20	0,001509	3,018E-02	1,776	3,501	3,562322	–0,06175	1,76	3,600607	–0,10003	2,86
М-6	¼ брикета (188,8 г)	270/543	552	9	0,001484	1,336E-02	1,812	4,316	3,83811	0,47768	11,07	3,864654	0,451136	10,45
М-7	¼ брикета (158,5 г)	280/553	596	43	0,001484	6,381E-02	1,678	2,752	2,79604	–0,04423	1,61	2,866946	–0,11513	4,18
М-8	¼ брикета (125,4 г)	290/563	598	35	0,001484	5,194E-02	1,672	2,958	2,752317	0,205349	6,94	2,825084	0,132582	4,48
М-9	¼ брикета (108,1 г)	300/573	610	37	0,002805	1,038E-01	1,639	2,265	2,495998	–0,23056	10,18	2,579677	–0,31424	13,87
М-10	Меньше ¼ брикета (61,2 г)	310/583	620	37	0,003317	1,227E-01	1,613	2,098	2,289979	–0,1922	9,16	2,382429	–0,28465	13,57
М-11	Меньше ¼ брикета (44,7 г)	320/593	649	56	0,003135	1,756E-01	1,541	1,740	1,728425	0,011285	0,65	1,844781	–0,10507	6,04
М-12	Меньше ¼ брикета (46,1 г)	320/593	635	40	0,003135	1,254E-01	1,575	2,076	1,993116	0,083066	4,00	2,098204	–0,02202	1,06
М-13	Меньше ¼ брикета (46,6 г)	320/593	633	42	0,003135	1,317E-01	1,580	2,027	2,031885	–0,00449	0,22	2,135322	-0,10793	5,32
HYL														
Н-1	Брикет целый (--- г), 33,7 мм	230/503	509	6	0,00136	0,00816	1,965	4,809	4,934069	–0,12556	2,61	5,006342	–0,19783	4,11
Н-2	Брикет целый (--- г), 33,5 мм	250/523	533	10	0,00136	0,01360	1,876	4,298	4,32377	–0,02608	0,61	4,346405	–0,04872	1,13
Н-3	½ брикета (327,6 г); 32,7 мм	270/543	555	12	0,001297	0,01556	1,802	4,163	3,810697	0,352098	8,46	3,791603	0,371192	8,92
Н-4	½ брикета (297,6 г); 33,0 мм	280/553	565	12	0,00154	0,01848	1,770	3,991	3,590691	0,400375	10,03	3,553703	0,437364	10,96
Н-5	½ брикета (239,5 г); 31,7 мм	285/558	588	30	0,00177	0,05310	1,701	2,936	3,113075	–0,1775	6,05	3,037241	–0,10166	3,46
Н-6	½ брикета (220,7 г); 31,1 мм	290/563	605	42	0,00173	0,07266	1,653	2,622	2,783395	–0,16143	6,16	2,680747	–0,05878	2,24
Н-7	¼ брикета (170,6 г); 23,1 мм	280/553	568	15	0,00251	0,03765	1,761	3,279	3,5262	–0,24678	7,53	3,483966	–0,20454	6,24
Н-8	¼ брикета (149,4 г); 21,5 мм	290/563	587	24	0,00221	0,05304	1,704	2,937	3,133063	–0,19635	6,69	3,058854	–0,12215	4,16
Н-9	Меньше ¼ брикета (103,6 г); 21,9 мм	300/573	600	27	0,00223	0,06021	1,667	2,810	2,87842	–0,0685	2,44	2,783501	0,026416	0,94
Н-10	Меньше ¼ брикета (67,4 г); 21,5 мм	310/583	601	18	0,00282	0,05076	1,664	2,981	2,859289	0,121358	4,07	2,762814	0,217833	7,31
Н-11	Меньше ¼ брикета (57,8 г); 13,2 мм	320/593	617	24	0,00314	0,07536	1,621	2,585	2,561618	0,023861	0,92	2,440932	0,144547	5,59
Н-12	Меньше ¼ брикета (50,1г); 15,2 мм	330/603	638	35	0,00287	0,10045	1,567	2,298	2,193582	0,104513	4,55	2,042963	0,255132	11,10

Уравнение (15) может быть преобразовано путем логарифмирования:

$$\ln P_{+} = \ln c - \frac{E}{R}\frac{1}{T}. \tag{18}$$

В результате замены переменных ($\ln P_{+}$ на Y, $\ln c$ на A_0, $-E / R$ на A_1, $1 / T$ на X) зависимость (18) преобразуется в линейную:

$$Y = A_0 + A_1 X. \tag{19}$$

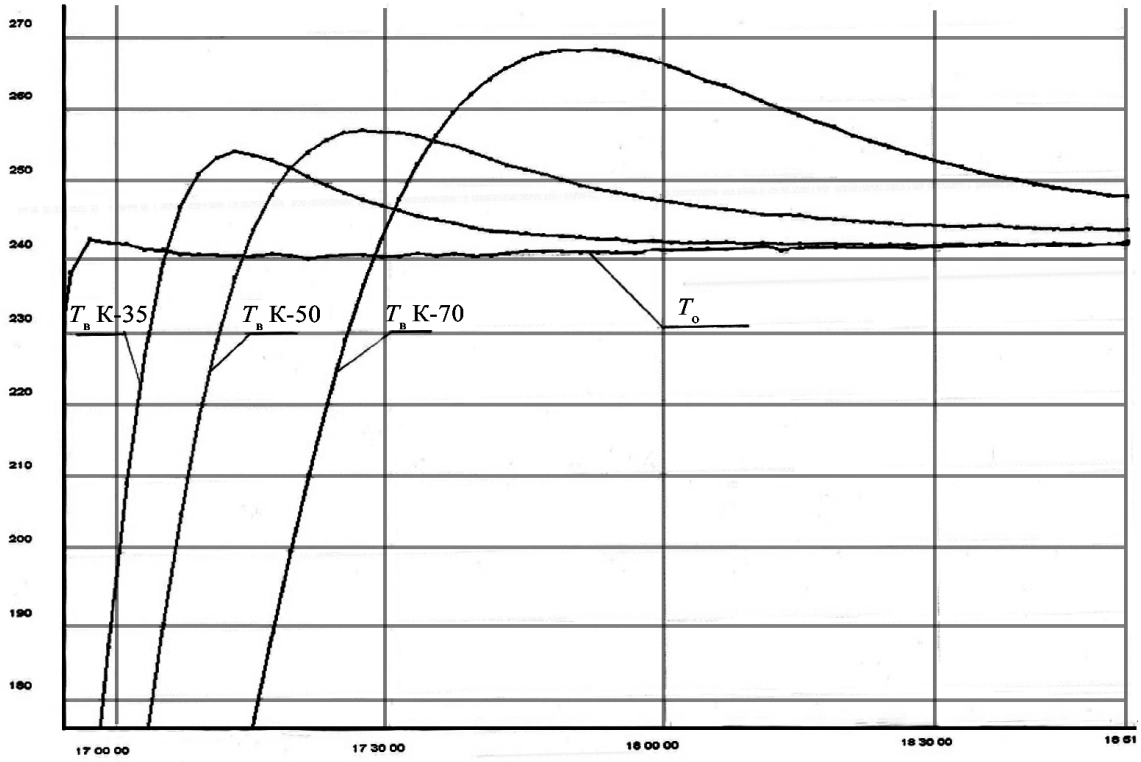


Рис. 7. Термограмма фиксации разогрева ΔT и влияния размера образца ГБЖ класса крупности 25–4 мм на его величину при T_0 = 240 °С

Полученные опытные значения кинетических параметров процесса самовозгорания приведены в табл. 4, результаты расчетного прогнозирования — в табл. 5. Прогнозирование выполнено для двух форм скоплений: цилиндрической и плоскопараллельной. Для всех видов ГБЖ при цилиндрической форме скопления критический размер (диаметр) примерно в два раза больше, чем при плоской форме (высота), независимо от уровня температуры окружающей среды. Опасность возникновения процесса теплового самовозгорания при значениях температуры окружающей среды более 75 °С для брикетов и ГБЖ класса крупности менее 25 мм и выше 4 мм возникает в случае, если высота слоя штабеля / бурта превысит 2,3 м для брикетов и 0,7 м для горячего брикетированного железа (ГБЖ) класса крупности менее 25 мм и выше 4 мм. При этом, если в течение 26 сут для брикетного штабеля / бурта и пяти суток для ГБЖ класса крупности менее 25 мм и выше 4 мм не принимать меры для ее снижения, то температура в слое материала (груза) превысит критическое значение $T_в \approx 370$ К (97 °С) и образуется очаг самовозгорания в геометрическом (теплофизическом) центре.

Под температурой окружающей среды следует понимать температуру нагретой поверхности, контактирующей с грузом, или температуру верхнего слоя самого материала, внутри которого сконцентрирована некоторая критическая масса влажного ГБЖ. Зона концентрации влажного ГБЖ, которая самонагревается и для которой теплоприток от реакции окисления, будет выше теплоотвода и станет очагом самовозгорания.

Таблица 5

Прогноз режимов и условий транспортировки (хранения) ГБЖ при заданной температуре окружающей среды

Температура окружающей среды, $T_о$, К (°С)	$c_р$, Дж/кг×К	ρ, кг/м^3	λ, Вт/м×К	τ, сут	$T_в$, К	m_E	$\alpha_к$, Вт·м$^{-2}$·К$^{-1}$	$X_{кр}$, м	$\alpha_{к+д}$, Вт·м$^{-2}$·К$^{-1}$	$X_{кр}$, м	$\alpha_к$, Вт·м$^{-2}$·К$^{-1}$	$X_{кр}$, м	$\alpha_{к+д}$, Вт·м$^{-2}$·К$^{-1}$	$X_{кр}$, м
ГБЖ в форме брикетов: E = 62 кДж × моль$^{-1}$; $T_с$ = 655 К; C = 1,55·10^4 с$^{-1}$							Цилиндрическое скопление				Плоскопараллельный слой			
273 (0)	512	2605	6,01	5657,8	283,8	5,557E-09	0,921	122,1	5,535	133,8	1,039	75,2	5,654	85,4
298 (25)	510	2605	5,89	684,0	311,0	4,596E-08	1,180	36,9	7,182	45,2	1,349	21,6	7,351	28,5
323 (50)	505	2605	5,77	116,2	338,4	2,704E-07	1,498	12,4	9,140	17,9	1,738	6,8	9,381	11,0
348 (75)	503	2605	5,50	25,8	366,0	1,219E-06	1,890	4,4	11,449	7,8	2,222	2,3	11,780	4,7
373 (100)	500	2605	5,22	7,1	393,8	4,444E-06	2,355	1,7	14,125	3,8	2,793	0,9	14,563	2,2
398 (125)	491	2605	4,95	2,3	421,9	1,365E-05	2,881	0,8	17,179	2,0	3,433	0,4	17,732	1,1
423 (150)	480	2605	4,67	0,9	450,2	3,644E-05	3,459	0,4	20,625	1,1	4,134	0,2	21,300	0,6
448 (175)	467	2605	4,37	0,4	478,7	8,656E-05	4,080	0,19	24,473	0,65	4,885	0,09	25,278	0,34
473 (200)	450	2605	4,05	4 ч	507,5	0,0001865	4,732	0,11	28,733	0,40	5,670	0,05	29,671	0,20
ГБЖ от 4 до 25 мм: E = 53 кДж × моль$^{-1}$; $T_с$ = 617 К; С = 4,0·10^3 с$^{-1}$							Цилиндрическое скопление				Плоскопараллельный слой			
273 (0)	515	2469	5,56	464,5	285,8	6,766E-08	1,358	30,2	5,972	36,4	1,552	17,7	6,166	22,8
298 (25)	520	2469	5,51	78,4	313,4	4,01E-07	1,705	9,9	7,707	14,1	1,980	5,5	7,982	8,6
323 (50)	540	2469	5,46	17,7	341,3	1,78E-06	2,140	3,5	9,782	6,1	2,520	1,8	10,162	3,6
348 (75)	547	2469	5,34	5,0	369,4	6,301E-06	2,645	1,4	12,203	2,9	3,141	0,7	12,699	1,6
373 (100)	550	2469	5,19	1,7	397,8	1,864E-05	3,212	0,6	14,981	1,5	3,833	0,3	15,602	0,8
398 (125)	550	2469	5,01	15,8 ч	426,5	4,769E-05	3,828	0,3	18,127	0,8	4,580	0,1	18,878	0,4
423 (150)	550	2469	4,81	7,0	455,6	0,0001083	4,488	0,1	21,653	0,5	5,376	0,1	22,542	0,2
448 (175)	554	2469	4,54	3,4	484,9	0,0002228	5,190	0,08	25,583	0,31	6,223	0,04	26,616	0,15
473 (200)	558	2469	4,27	1,8	514,5	0,0004221	5,925	0,05	29,925	0,20	7,107	0,02	31,108	0,09
Мелочь ГБЖ: E = 40 кДж·моль$^{-1}$; $T_с$ = 717 К; C = 2,0·10^2 с$^{-1}$							Цилиндрическое скопление				Плоскопараллельный слой			
273 (0)	518	2377	1,54	41,8	290,5	7,511E-07	2,304	4,8	6,918	5,7	2,634	2,8	7,249	3,5
298 (25)	540	2377	1,56	11,4	319,2	2,749E-06	2,690	2,1	8,692	2,8	3,114	1,2	9,116	1,7
323 (50)	554	2377	1,57	3,9	348,2	8,114E-06	3,123	1,0	10,766	1,5	3,655	0,5	11,297	0,9
348 (75)	583	2377	1,63	1,5	377,6	2,026E-05	3,614	0,5	13,172	0,9	4,266	0,3	13,824	0,5
373 (100)	608	2377	1,68	17 ч.	407,5	4,426E-05	4,143	0,3	15,913	0,6	4,919	0,1	16,689	0,3
398 (125)	618	2377	1,68	8,7	437,8	8,687E-05	4,686	0,2	18,984	0,4	5,582	0,1	19,881	0,2
423 (150)	624	2377	1,66	4,8	468,7	0,0001561	5,241	0,1	22,407	0,3	6,257	0,1	23,423	0,1
448 (175)	629	2377	1,66	2,9	500,0	0,0002609	5,805	0,07	26,198	0,20	6,941	0,03	27,334	0,10
473 (200)	632	2377	1,64	1,8	531,8	0,0004102	6,374	0,05	30,375	0,15	7,628	0,02	31,629	0,08

Данные табл. 5 позволяют прогнозировать вероятность самовозгорания в трюме судна груза ГБЖ, в котором имеются зоны увлажнения, осуществляется контроль температуры поверхности груза (обязательное требование МКМПНГ для всех видов (ЖПВ)) и дополнительно контролируется нижний слой груза со стороны двойного дна. Так, в случае, если температура поверхности груза или его нижних слоев достигнет 75 °С и не прослеживается тенденция к ее снижению за расчетный период времени (период индукции τ), то при высоте виртуального цилиндра, вписанного в центральную часть насыпи груза в трюме, равной или более: для ГБЖ— брикет 4,4 м; для ГБЖ класса крупности 25–4 мм — 0,7 м; для мелочи ГБЖ — 0,3 м, температура в геометрическом центре скопления достигнет, соответственно, 366 К (93 °С), 369 К (96 °С) и 378 К (105 °С). Подобные значения температур далеки от установленных экспериментально температур самовозгорания $t_{св}$ для изученных форм ГБЖ (ЖПВ): ГБЖ брикет (ЖПВ-А) — 280–290 °С; ГБЖ класса крупности 25–4 мм (ЖПВ-В) — 220–270 °С; мелочь ГБЖ (ЖПВ-С) — 230–275 °С.

Таким образом, для груза ГБЖ брикет (ЖПВ-А) перевозка навалом безопасна при высоте выровненной насыпи, равной 4–5 м и продолжительности рейса не более 26 сут, при условии, что температура груза за период перевозки не превысит 348 К (75 °С). Перевозка ГБЖ класса крупности 25–4 мм (ЖПВ-В) будет безопасной в случае, если температура груза при погрузке не превышает 323 К (50 °С), а в течение рейса — 60–65 °С; высота выровненной насыпи в трюме не должна превышать 3,5–4 м, а длительность рейса — 18 сут, если температура груза за этот период не примет значение, по каким-либо причинам, более 341 К (68 °С). Перевозка навалом ЖПВ-С всегда будет связана с высоким риском возникновения пожара, поэтому целесообразно исключить из МКМПНГ индивидуальную опись на груз «Direct Reduced Iron (C), By-product fines» и перевозить мелочь / отсев (ЖПВ) в универсальных или специальных контейнерах для НГ. При загрузке в контейнер формируется только плоскопараллельный слой. Высота слоя металлизованной продукции в контейнере зависит от его грузоподъемности и УПО.

Очевидно, что перевозка брикетов (ЖПВ) в 20-футовых контейнерах практически безопасна (табл. 6). Расчетная высота слоя груза в контейнере не превышает $X_{кр}$, повышение температур до опасных уровней возможно лишь при нештатных ситуациях (горение соседнего контейнера, проведение огневых работ и т. д.).

Таблица 6

Прогноз условий теплового самовозгорания металлизованной продукции в 20-футовом контейнере

Наименование груза	УПО, м³/т	Расчетная высота слоя груза в контейнере, м	Условия самовозгорания по прогнозу			
			$X_{кр}$, м	T_0, °С	$T_в$, °С	τ, ч
Брикеты в. с.	0,366	0,76	0,9	100	120	168
ГБЖ кл. круп. 25–4 мм	0,405	0,84	0,7	75	96	120
Мелочь ГБЖ	0,421	0,87	0,5	50	75	96

Безопасность перевозки груза ГБЖ класса крупности 25–4 мм и мелочи ГБЖ будет обеспечена при высоте слоя груза в контейнере менее 0,7 м и 0,5 м соответственно. Таким образом, безопасная загрузка контейнера должна быть меньше допустимой на 16–18 % для ГБЖ класса крупности 25–4 мм и на 42 % для мелочи ГБЖ. Существует опасность самосогревания груза до уровня расчетных температур и перехода в состояние самовозгорания: для ГБЖ класса крупности 25–4 мм, в случае, если в течение пяти суток не будут приняты меры к охлаждению груза; для мелочи ГБЖ — в течение четырех суток. Очевидно, что 20-футовые контейнеры с этими видами металлизованной продукции пожароопасны при любом внешнем тепловом воздействии на них.

Транспортировка брикетов при допустимой загрузке 40-футового контейнера, с точки зрения самовозгорания материала, еще более безопасна, чем в 20-футовом контейнере (табл. 7), поскольку расчетная высота слоя груза в контейнере также не превышает $X_{кр}$ и уровни критических температур окружающей среды и груза достаточно высокие.

Таблица 7

Прогноз условий теплового самовозгорания металлизованной продукции в 40-футовом контейнере

Наименование груза	УПО, м³/т	Расчетная высота слоя груза в контейнере, м	Условия самовозгорания по прогнозу			
			$X_{кр}$, м	T_0, °С	$T_в$, °С	τ, ч
Брикеты в.с.	0,366	0,35	0,4	125	149	55
ГБЖ кл. круп. 25–4 мм	0,405	0,38	0,3	100	125	41
Мелочь ГБЖ	0,421	0,40	0,3	75	105	36

Безопасность перевозки груза ГБЖ класса крупности 25–4 мм и мелочи ГБЖ будет обеспечена при высоте слоя груза не более 0,3 м. Безопасная загрузка контейнера должна быть меньше допустимой на 21–23 % для ГБЖ класса крупности 25–4 мм и на 25 % для мелочи ГБЖ. Существует опасность самосогревания груза до уровня расчетных температур и перехода в состояние самовозгорания: для ГБЖ класса крупности 25–4 мм — в случае, если в течение 40 ч не будут приняты меры к охлаждению груза; для мелочи ГБЖ — 36 ч. Любое попадание на груз морской воды приведет к повышению температуры части груза в 1,3–1,5 раза и сокращению периода индукции примерно в 2 раза.

Заключение (Conclusion)

Определение кинетических параметров процесса самовозгорания для навалочного груза при известных теплофизических показателях материала и, как следствие, наличии расчетных критических значений высоты или диаметра слоя скопления, а также продолжительности транспортировки в зависимости от уровня контролируемых температур позволит обеспечить пожаробезопасность транспортных операций. Значения допустимой высоты груза по критерию пожарной безопасности в грузовом помещении судна и продолжительности рейса должны использоваться при составлении грузового плана.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Internatioanal Asssociation of Dry Cargo Shipowners [Электронный ресурс]. — Режим доступа: https://www.intercargo.org/bulk-carrier-casualty-report—2017/ (дата обращения: 10.11.2018).

2. Международный кодекс морской перевозки навалочных грузов (МКМПНГ) с поправкой 01-11 и дополнением. — СПб.: ЗАО «ЦНИИМФ», 2012. — 512 с.

3. Международный кодекс морской перевозки навалочных грузов (МКМПНГ). Бюллетень изменений и дополнений № 1. — СПб.: ЗАО «ЦНИИМФ», 2015. — 82 с.

4. *Киселев Я. С.* Физические модели горения в системе пожарной безопасности / Я. С. Киселев, О. А. Хорошилов, Ф. В. Демехин. — СПб.: Санкт-Петербургский университет Государственной противопожарной службы МЧС России, 2009. — 388 с.

5. Пат. 2176213 Российская Федерация, МПК B63B 25/00. Способ хранения и транспортировки металлизованных окатышей / А. К. Барановская [и др.]; Заяв. и патентообл. ЗАО «Морское грузовое бюро». — № 2000103757; Заявлено 03.02.2000; Опубл. 27.11.2001, Бюл. № 11. — 12 с.

6. *Завидонский В. А.* Пути защиты губчатого железа от вторичного окисления / В. А. Завидонский, В. С. Монахова, И. М. Гарина // Черная металлургия. — 1979. — Бюл. № 4. — С. 21–40.

7. НД № 2-030401-001. Руководство по техническому наблюдению за тарой для опасных грузов при оценке соответствия положениям Международного Кодекса морской перевозки опасных грузов. — СПб.: Российский морской регистр судоходства, 2017. — 20 с.

8. Кодекс практики безопасной загрузки и разгрузки навалочных судов. Резолюция А.862(20). — СПб.: ЗАО «ЦНИИМФ», 2011. — 80 с.

9. ГОСТ 12.1.044–89 (ИСО 4589–84). Система стандартов безопасности труда (ССБТ). Пожаровзрывоопасность веществ и материалов. Номенклатура показателей и методы их определения. — М.: ФГУП «Стандартинформ», 2006. — 100 с.

10. ГОСТ 19433–88. Грузы опасные. Классификация и маркировка. — М.: ИПК «Изд-во стандартов», 2004. — 49 с.

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

12. *Kuznetsov A.* The Influence of the Storage Strategy on the Complexity of the Container Selection Procedure / A. Kuznetsov, A. Kirichenko, O. Izotov // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. — IOP Publishing, 2018. — Vol. 171. — Is. 1. — Pp. 012046. DOI: 10.1088/1755-1315/171/1/012046.

13. *Kuznetsov A. L.* Simulation Model of Container Land Terminals / A. L. Kuznetsov, A. Kirichenko, J. J. Eglit // TransNav: International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation. — 2018. — Vol. 12. — Is. 2. — Pp. 321–326. DOI: 10.12716/1001.12.02.13.

REFERENCES

1. Internatioanal Asssociation of Dry Cargo Shipowners. Web. 10 Nov. 2018 <https://www.intercargo.org/bulk-carrier-casualty-report-2017/>.

2. *Mezhdunarodnyi kodeks morskoi perevozki navalochnykh gruzov (MKMPNG) s popravkoi 01-11 i dopolneniem*. SPb.: ZAO "TsNIIMF", 2012.

3. *Mezhdunarodnyi kodeks morskoi perevozki navalochnykh gruzov (MKMPNG). Byulleten' izmenenii i dopolnenii №1*. SPb.: ZAO "TsNIIMF", 2015.

4. Kiselev, Ya. S., O. A. Khoroshilov, and F. V. Demekhin. *Fizicheskie modeli goreniya v sisteme pozharnoi bezopasnosti*. SPb.: Sankt-Peterburgskii universitet Gosudarstven-noi protivopozharnoi sluzhby MChS Rossii, 2009.

5. Baranovskaya, A. K., G. A. Zinyagin, B. P. Kolesnikov, L. A. Kuli-shova, S. E. Lazutkin, and N. N. Ostroukh. RU 2176213, IPC B 63 B 25/00. Sposob khraneniya i transportirovki metallizovannykh okatyshei. Russian Federation, assignee. Publ. 27 Nov. 2001.

6. Zavidonskii, V. A., V. S. Monakhova, and I. M. Garina. "Puti zashchity gubchatogo zheleza ot vtorichnogo okisleniya." *Chernaya metallurgiya* 4 (1979): 21–40.

7. Russian Federation. Technical Surveillance Guide ND № 2-030401-001. Rukovodstvo po tekhnicheskomu nablyudeniyu za taroi dlya opasnykh gruzov pri otsenke sootvetstviya polozheniyam Mezhdunarodnogo Kodeksa morskoi perevozki opasnykh gruzov. SPb.: Rossiiskii morskoi registr sudokhodstva, 2017.

8. *Kodeks praktiki bezopasnoi zagruzki i razgruzki navalochnykh sudov. Rezolyutsiya A.862*(*20*). SPb.: ZAO "TsNIIMF", 2011.

9. Russian Federation. State Standard GOST 12.1.044–89 (ISO 4589–84). Sistema standartov bezopasnosti truda (SSBT). Pozharovzryvoopasnost' veshchestv i materialov. Nomenklatura pokazatelei i metody ikh opredeleniya. M.: FGUP «Standartinform», 2006.

10. Russian Federation. State Standard GOST 19433–88. Gruzy opasnye. Klassifikatsiya i markirovka. M.: IPK «Izdatel'stvo standartov», 2004.

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

12. Kuznetsov, A., A. Kirichenko, and O. Izotov. "The Influence of the Storage Strategy on the Complexity of the Container Selection Procedure." *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. Vol. 171. No. 1. IOP Publishing, 2018. 012046. DOI: 10.1088/1755-1315/171/1/012046.

13. Kuznetsov, A. L., Alexander Kirichenko, and J. J. Eglit. "Simulation Model of Container Land Terminals." *TransNav: International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation* 12.2 (2018): 321–326. DOI: 10.12716/1001.12.02.13.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Ситов Александр Николаевич —
кандидат экономических наук, доцент
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова»
198035, Российская Федерация, г. Санкт-Петербург, ул. Двинская, 5/7
e-mail: *sitov@mcb.spb.ru*, *kaf_top@gumrf.ru*

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Sitov, Alexandr N. —
PhD, associate professor
Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping
5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg, 198035, Russian Federation
e-mail: *sitov@mcb.spb.ru*, *kaf_top@gumrf.ru*

Маловечко Владимир Александрович —
кандидат технических наук, доцент
ООО «Морское Грузовое Бюро»,
198035, Российская Федерация, г. Санкт-Петербург,
Межевой канал, 4, офис 301
e-mail: *malovechko@mcb.spb.ru*
Слицан Андрей Евгеньевич —
кандидат технических наук, доцент
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала
С.О. Макарова»
198035, Российская Федерация, г. Санкт-Петербург,
ул. Двинская, 5/7
e-mail: *slicanae@gumrf.ru*

Malovechko, Vladimir A. —
PhD, associate professor
Marine Cargo Bureau
office 301, 4 Mezhevoy canal, St. Petersburg,
198035, Russian Federation
e-mail: *malovechko@mcb.spb.ru*
Slitsan, Andrey E. —
PhD, associate professor
Admiral Makarov State University of Maritime
and Inland Shipping
5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg, 198035,
Russian Federation
e-mail: *slicanae@gumrf.ru*

Статья поступила в редакцию 15 ноября 2018 г.
Received: November 15, 2018.

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

DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-6-1179-1190

THE DIRECTIONS OF THE TRANSPORT INDUSTRY DIGITALIZATION

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

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

Digitalization announced to serve as the main way to improve the efficiency of the national economy and its transportation industry. It is expected that integration of trade contractors, transport market players, various mediators and other members of transportation industry, resulted from this process, will lead to general reduction in the time for transportation organization and allow to realize effective planning measures and operational transportation management on base of new appeared features. This should facilitate access to transport market for customers and carriers excluding possible discrimination on the production volume. However, structure of integrated electronic documents, accompanying multimodal transportation, remains an unresolved problem. The article discusses the structure of the transport space that conducts flows that accompany shipping, i.e. information, financial and material ones, and establish the phasing of their development. Shipping documents are addressed as information component of transaction coordination. The content and development of transport block-chain technologies is researched in the context of transport space and transport logistics. The content of current sipping documents (specific by modes of transportation), in particular, cargo shipping documents is reviewed. An assessment of the information compatibility for implementation of digital block-chain technology is made. It is assumed that an intermediate electronic document, specifically the passport of transportation should be introduced, with its unique number referred to in any shipping documents. Conclusion is made that the impetus for enhancing the efficiency and ensuring the accessibility of the transport industry is possible on the basis of the decomposition of flowing processes in transport space. The transport space is heterogeneous, it is structured by layers, which correspond both to phases and character of the providing flows; this fact objectively establishes the current variety of databases and formats of documents, ensuring the flow of the processes in the transport space different by modes of transportation. The study shows that the introduction of the intermediate electronic document, the passport of transportation, will help to spread the block-chain technologies.

Keywords: transport space, transport logistics, digitalization, block-chain technology, transportation passport.

For citation:
Kuznetsov, Aleksandr L., Aleksandr V. Kirichenko, and Victoria N. Shcherbakova-Slyusarenko. "The directions of the transport industry digitalization." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 10.6 (2018): 1179–1190. DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-6-1179-1190.

УДК 656.029.4

НАПРАВЛЕНИЯ ЦИФРОВИЗАЦИИ ТРАНСПОРТНОЙ ОТРАСЛИ

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

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

В настоящее время цифровизация выбрана в качестве магистрального пути повышения эффективности национальной экономики и ее транспортной отрасли. Ожидается, что информационная интеграция торговых контрагентов, а также операторов транспортного рынка, предприятий различных видов транспорта и других участников перевозок, которая будет являться результатом этого процесса, приведет к общему снижению времени на организацию перевозок и позволит на основе появившихся новых возможностей учета и анализа реализовать эффективные мероприятия по планированию и оперативному управлению перевозками. Это должно облегчить доступ на транспортный рынок клиентам и перевозчикам, исключив возможную дискриминацию по критерию масштаба производства. Однако проблемным вопросом является структура интегрированных электронных документов, сопровождающих мультимодальную перевозку. В статье рассматривается структура транспортного пространства, проводящего потоки, обусловленные выполняемыми перевозками: информационные, фи-

нансовые, материальные, а также устанавливается этапность их прохождения. Транспортные документы рассматриваются как информационная составляющая координации транзакций. Исследовано содержание и развитие блокчейн-технологий на транспорте в контексте транспортного пространства и транспортной логистики. Рассмотрено информационное наполнение действующих транспортных документов (на видах транспорта), в частности, грузовых перевозочных документов. Выполнена оценка их информационной совместимости в целях реализации цифровой блокчейн-технологии. Сделано предположение о необходимости ввода промежуточного электронного документа — паспорта перевозки с воспроизведением его уникального номера в генерируемых в ходе перевозки грузовых перевозочных документов. В результате сделан вывод о том, что актуализация перспективного направления повышения эффективности и обеспечения доступности транспортной отрасли возможна на основе декомпозиции потоковых процессов в транспортном пространстве; транспортное пространство является неоднородным, структурированным по слоям, соответствующим как этапам, так и характеру обеспечивающих потоков; этим же обусловлено объективно сложившееся и документально зафиксированное разнообразие баз данных и проформ документов, обеспечивающих прохождение процессов в транспортном пространстве, в основном различающихся по видам транспорта. Указано, что перспективным шагом на пути цифровизации транспортной отрасли может явиться введение промежуточного электронного документа (паспорта перевозки), предваряющего повсеместный переход к блокчейн-технологиям.

Ключевые слова: транспортное пространство, транспортная логистика, цифровизация, блокчейн-технологии, паспорт перевозки.

Для цитирования:
Кузнецов А. Л. Направления цифровизации транспортной отрасли / А. Л. Кузнецов, А. В. Кириченко, В. Н. Щербакова-Слюсаренко // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2018. — Т. 10. — № 6. — С. 1179–1190. DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-6-1179-1190.

Введение (Introduction)

В настоящее время в качестве магистрального пути повышения эффективности национальной экономики и ее транспортной отрасли рассматривается цифровизация [1]–[3]. Очевидно, что информационная интеграция торговых контрагентов, участников перевозок, операторов транспортного рынка, а также предприятий различных видов транспорта будет способствовать общему снижению времени на организацию перевозок и позволит на основе учета и анализа проводить эффективные мероприятия по планированию и оперативному управлению перевозками, облегчит доступ на транспортный рынок клиентуре и перевозчикам, исключив возможную дискриминацию по масштабам производства [4]–[6].

Вместе с тем любая перевозка оказывается следствием достаточно длинной цепочки взаимоотношений и обычно объединяет несколько видов транспорта (именно поэтому объем перевозок автомобильного транспорта практически вдвое превышает суммарные объемы перевозок иных видов транспорта ввиду так называемой «последней мили», приходящейся на автомобильный транспорт). В то же время перечни, объемы и формы необходимой информации, используемой на магистральных видах транспорта, существенно разнятся [7]. Таким образом, проблемным вопросом является структура интегрированных электронных документов, сопровождающих всю мультимодальную перевозку.

Методы и материалы (Methods and Materials)

Транспортно-логистическая деятельность и ее участники. Основу концепции логистики составляет рассмотрение всего материального производства и распределения как совокупности потоковых процессов различной природы и вида, протекающих в особом логистическом пространстве, причем при самых различных масштабах перевозок [8].

Логистическое пространство формируется из отдельных объектов произвольной природы, выполняющих различные операции, результатом которых является некоторый продукт. Для выполнения каждой операции логистический объект нуждается в определенных ресурсах,

которые, в свою очередь, являются продуктами других операций. Чередующаяся последовательность ресурсов, выполняющих операции объектов и продуктов, образует элементарные звенья, из которых формируется маршрут преобразования исходного ресурса (сырья) в конечный продукт потребления. В зависимости от конкретной задачи анализа или управления в рассмотрение вовлекаются различные маршруты подобного рода, которые в общем случае называются *цепями поставки*.

Произведенный продукт, который требуется в цепях поставки в качестве ресурса, необходим также в различных пространственных локациях в различные моменты времени и в различных количествах. Основным телеологическим назначением логистических цепей является обеспечение продукта в нужном месте, в нужное время, в нужном состоянии и в нужном количестве. Когда эта задача решается в пределах одного логистического звена, маршрута или даже отдельной цепи поставок, она становится функцией входящей или исходящей логистики.

Если возникает необходимость постоянного непрерывного согласования спроса на ресурсы с предложением их в форме производства продуктов, разделенных значительными географическими расстояниями, распределенных по обширным территориям, разграниченных различными средами и рассматриваемыми на протяжении длительного периода времени, соответствующая проблема составляет предметную область практической деятельности, которую изучает транспортная логистика [9]–[12]. Иными словами, транспортная логистика является средством согласования спроса на транспортировку продуктов, понимаемую как перемещение в пространстве и согласование во времени, с предложением на эту транспортировку. Как следствие, отличительной чертой транспортной логистики является отсутствие материального, «физического» преобразования ресурса в иной продукт, т. е. производственных операций как таковых. Исходя из этого, непосредственными «инициаторами» транспортно-логистической деятельности являются в первую очередь производители продукта и его потребители как заказчики отдельных актов транспортировки, создающие спрос на нее.

В свою очередь продукт становится ресурсом как результат коммерческой сделки, превращающий его в товар. Тем самым в транспортно-логистической деятельности возникают продавцы, аффилированные (взаимозависимые) с производителем, и покупатели, аффилированные с потребителем *на стадии планирования в информационном логистическом пространстве.*

Товар должен быть передан от продавцов к покупателям как физически, так и с легитимным переходом права собственности на него. Если этот процесс на возмездной основе осуществляет третья сторона, то ставший товаром продукт превращается в груз. Как следствие, в транспортно-логистической деятельности появляются грузоотправитель, грузополучатель и перевозчик *на стадии организации в информационном логистическом пространстве.*

Организация перевозок является сложной и многокритериальной задачей, решение которой могут брать на себя посредники: агенты, грузовые форвардеры, экспедиторы, импортеры, экспортеры, представители, транспортные компании и др. Материальное воплощение достигнутых договоренностей о выполнении транспортировки составляет *стадию оперативного управления в операционном логистическом пространстве*.

Финансовое обеспечение перевозок, так же, как и страхование риска и ответственности различных участников, требует наличия соответствующих структур. Важность транспортной системы в интересах государства, сопряженная с перевозками, риски и опасность, а также фискальные и экономические аспекты требуют вовлечения различных государственных и ведомственных учреждений и институтов, также составляющих свое подмножество участников транспортно-логистической деятельности.

Общие транспортно-логистические процессы. В общем случае согласование спроса на любой продукт с предложением на него связано с маркетинговой и рекламно-информационной деятельностью. Именно эта деятельность принципиально позволяет идентифицировать спрос и предложение, количественно оценить масштабы и их соответствие, сформировать возможные

варианты решения. Эта деятельность носит не разовый, а постоянный характер, что позволяет рассматривать ее как соответствующий процесс.

Идентификация связанных между собой пар продукта, т. е. предложения и спроса на него (в качестве ресурса), инициирует процесс переговоров о его покупке-продаже, который также является итерационным и постоянным. Данный процесс и сопутствующие ему процедуры принято называть *процессом контрактинга*. Вся эта деятельность формирует *стадию планирования в информационном логистическом пространстве*.

Успешное завершение переговоров и ясное распределение роли продавца и покупателя в организации процесса передачи товара превращает одного из них в грузоотправителя, а другого — в грузополучателя. В ряде случаев делегирование функций приводит к появлению на этом этапе принципалов и иных посредников. При любых обстоятельствах на того или иного участника транспортно-логистической деятельности возлагается ответственность за организацию перевозки. В процессе перевозки возникает сопутствующий поток перехода ответственности и собственности на груз от одного участникак другому. В любом случае поиск перевозчика, выполняемый по тем или иным критериям, выбор организаций, предоставляющих банковские гарантии и выполняющих соответствующие платежии осуществляющих страхование ответственности, а также многие иные функции лежат на одном из участников, инициирующих эти процессы и находящихся в надсистемном пространстве.

Контроль и отчетность являются внутрисистемными процессами, но формирование их состава и полноты осуществляется регуляторами, также находящимися в надсистемном пространстве.

Транспортно-логистические подпространства. По своей гносеологической природе все указанные ранее процессы протекают в трех отдельных подпространствах: информационном, финансовом и материальном (финансовое и материальное могут рассматриваться как операционное подпространство). В *информационном пространстве* происходит маркетинг, рекламная деятельность, контрактинг, переходы права собственности и др. В *финансовом пространстве* проходит оплата оговоренных в отдельных сделках или общими положениями денежных выплат и компенсаций. В *материальном пространстве* реализуются потоки перемещения транспортных средств, груженых и порожних, потоки транспортировки и складирования грузов. Все три подпространства связаны между собой, что обеспечивает возможность планирования и координации протекающих в них потоков. Любая отдельная транспортировка складывается как динамическая совокупность потоков во всех трех пространствах, т. е. развивающихся во времени процессах. В свою очередь каждый отдельный этап процесса, протекающего в том или ином подпространстве, состоит из отдельных шагов, называемых *транзакциями*.

Способом синхронизации, инициирующим начало составляющих частные потоки транзакций и дающим сигнал об их окончании, являются документы. Стандартные по форме документы, генерируемые и пересылаемые в информационном и финансовом пространствах и между ними, сопровождают процесс материального перемещения и способствуют достижения цели как отдельной транспортировки, так и транспортно-логистической цепи в целом. Документооборот может происходить в виде передачи материальных носителей (бумажных) в электронной сфере или в смешанном виде. Перемещение документов, выполняемое в электронной сфере, способствующее решению заданного множества задач транспортировки в заданных условиях и с требуемым качеством, инициирование связанных с материальным перемещением процедур, контроль выполнения требований и ограничений, сбор статистической информации и другие смежные компоненты — все это составляет функциональное назначение цифровой логистики.

Электронной средой, позволяющей реализовать цифровую логистику, в настоящее время является блокчейн-технология.

Появление блокчейн-технологии. Цифровизация транспорта через интеграцию информационных технологий, внедряемых в управление и эксплуатацию транспорта, появилась от-

носительно давно. В то время большинство примеров внедрения информационных технологий было связано с повышением эффективности использования транспортного оборудования и спутниковой навигацией, а проблема связанных с транспортировкой транзакций в комплексных процедурах, особенно при международных перевозках, оставалась нерешенной. Предпринимались различные попытки совершенствования этой системы транзакций, такие как внедрение EDI (Electronic Data Interchange), которые не получили широкого распространения.

Многие отдельные компании оказались способны оцифровать и автоматизировать внутренние управленческие процессы, но вопросы их взаимодействия и рост объемов информации, необходимой для совершения внешних транспортных транзакций, препятствовал нахождению общего решения проблемы. Появление в 2010-х гг. блокчейн-технологии дало новый толчок к попыткам решения проблемы роста сложности транспортных транзакций, особенно при ее рассмотрении в логистическом контексте.

Блокчейн (англ. *blockchain*, *block-chain*, *blockchain*) — выстроенная по определенным правилам непрерывная последовательная цепочка блоков (связный список), содержащих информацию. Фактически представляет собой распределенный электронный объект (обобщенную учетную запись), совместно используемый всеми сетевыми серверами, фиксирующими отчеты транзакций в виде зашифрованных блоков постоянным и проверяемым способом. Часто это называют *технологией цифровой бухгалтерии* (Digital Ledger Technology (DLT)). Каждый такой блок представляет собой уникальный цифровой объект, который хранится на множестве серверов (узлов) сети файлообменников. Последняя все время проверяет и обеспечивает соответствие каждой копии своему эквиваленту. Как только запись в блоке изменена, внести в нее изменение очень сложно. Использование блокчейн, по сути, является технологией бухгалтерской отчетности и способом упрощения транзакций, позволяющим поддерживать категории собственности и прав пользования такими объектами, как валютные накопления, билеты, товары и др. Эта же технология предполагает возможность использования или передачи подобных объектов с максимальной безопасностью.

Отличительная особенность и новизна блокчейн-технологии состоит в том, что она не требует центрального регулирующего органа типа «расчетной палаты» (например, банка) для одобрения и регистрации любых транзакций. Это позволяет, в принципе, избавиться от посредников в системе транзакций без потери ее целостности. Такое традиционное понятие, как *доверие* (соответствие ожидаемым нормам) в отношении посредников тем самым исключается, поскольку оно переносится на систему.

Блокчейн-технология теоретически предоставляет следующие возможности:

– замену медленных ручных процедур быстрыми автоматическими;

– отслеживание происхождения и свойств грузов (сырья, полуфабрикатов, готового продукта) и пассажиров;

– информацию о грузах и пассажирах, обеспечивающую своевременность оплаты, страхования и уплаты таможенных сборов;

– информацию о состоянии грузов и пассажиров, позволяющую отслеживать их во время транспортировки или при передаче между видами транспорта;

– информацию для регулирующих органов о грузах и пассажирах, задействованных участниках (экспортерах, импортерах, перевозчиков и др.).

Главной целью внедрения описываемой технологии является прибавление стоимости в сфере ее использования. Основные компоненты, способствующие достижению данной цели, следующие.

Принципы. Главный принцип технологии состоит в использовании информационных блоков, которые хранятся и кодируются в распределенной сети. «Умные контракты» еще более увеличивают преимущества гибкости системы за счет возможности автоматической проверки и выполнения указанных ранее положений контракта.

Функции. В соответствии с указанными принципами, блокчейн-технология выполняет несколько функций по обработке хранимой в распределенной базе данных информации. Эта информация является проверяемой, что означает возможность отслеживания данных и транзакций, она является неизменной, т. е. не может быть изменена без согласия всех вовлеченных участников. При этом все участники имеют доступ к данной информации и транзакциям, что обеспечивает ее прозрачность. Соответствующие реестры могут быть либо публичными, обеспечивающими доступ ко всей информации, либо частными, когда доступ предоставляется с разрешения других участников.

Использование информации. Информация в сети блокчейн используется главным образом для выполнения транзакций, которые выполняются в соответствии с рассмотренными ранее принципами, с помощью рассмотренных функций. Это повышает прозрачность всех объектов, вовлеченных в транзакции, поскольку и пользователь, и поставщик услуг могут видеть такие атрибуты, как количество, цена и наличие.

Процессы. Управление контрактами является одним из процессов, поддерживаемых данной технологией, поскольку контракты становятся прозрачными, отслеживаемыми и одновременно используемыми всеми вовлеченными участниками, в то время как информация является неизменной и проверяемой. «Умные контракты» позволяют использовать автоматические механизмы разрешения споров. Все это позволяет более адекватно согласовывать предложение и спрос, устранять избыточных посредников вследствие отсутствия необходимости в «расчетных центрах».

Результаты. Среди прочего, ожидаемыми результатами являются повышение эффективности (стоимости), увеличение надежности и устранение ошибок в процессах, поддерживаемых блокчейн-технологией. Это особенно важно для сферы транспорта, поскольку в ней стоимостной фактор играет важнейшую роль вследствие капиталоемкости объектов, их мобильности и интенсивности транзакций.

Цифровой интермодализм. На рис. 1 [11] показан пример простой интермодальной транспортной цепи поставок, включающий экспортера, импортера, перевозчиков и терминалы. Данный пример предполагает, что субъектом перевозки является один стандартный сухогрузный контейнер, поскольку рефрижераторные контейнеры или контейнеры с опасным грузом потребовали бы большее количество транзакций и документов.

Реализация интермодальной транспортной цепи поставок предполагает выполнение серии операций и протекание сопутствующего информационного потока. Напрямую блокчейн-технология не связана с этими операциями, но она может существенно изменить способ, используемый для хранения и обмена информацией между вовлеченными сторонами. В частности, подготовка заказа может потребовать выполнения задания по упаковке и погрузке в контейнер. Этот заказ генерирует информационный поток, вовлекающий сертификат происхождения, коммерческий инвойс, упаковочный лист, страховое свидетельство, а также договор с перевозчиком (логистическим провайдером) о перемещении контейнера в указанное местоположение. Вся эта информация может быть сохранена в блокчейн и сделана доступной для перевозчика или иных вовлеченных в данный процесс участников транспортной цепи, которые будут использовать ее в своих целях, одной из которых является формирование блокчейн-коносамента.

Автоперевозчик использует информацию из блокчейн для подготовки своего автомобильного коносамента (автомобильной накладной), который добавляется к блокчейн и вступает в силу, как только контейнер забирается у отправителя. Выполнение автомобильным перевозчиком своих транспортных услуг добавляет к блокчейн дополнительные блоки (например, специфицирует оборудование (автомобиль и прицеп), дату получения контейнера от отправителя, идентификационный номер контейнера и иные важные детали, возникающие при перевозке. К ним может относиться прохождение определенного пункта (например, пункта оплаты), длительность стоянки для отдыха или смены водителя, наличие магистрального тягача или прицепа. Использование датчиков позволяет автоматически вводить информацию в блокчейн (например, о местоположении).

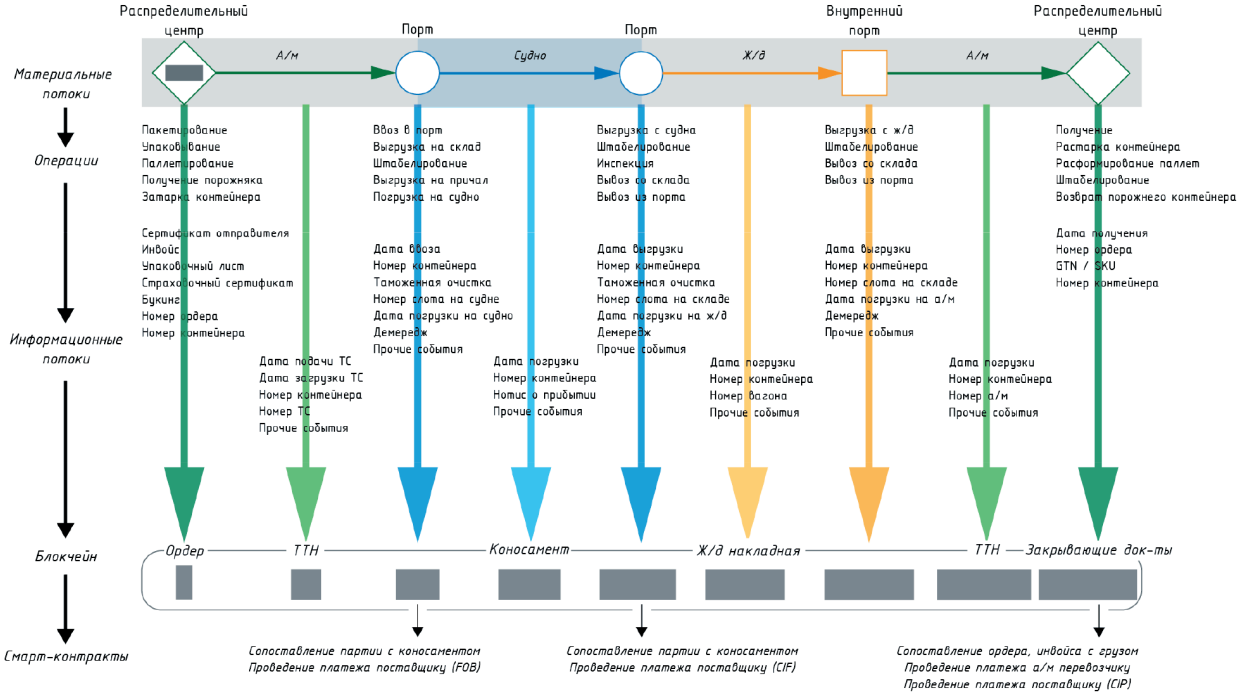


Рис. 1. Пример транзакций в интермодальной сети

На терминале морского порта выполнение необходимых операций будет продолжать расширение блокчейн. Наиболее важными позициями будут следующие: время въезда на терминал, адрес размещения на складе открытого хранения, прохождение таможенной очистки. Сюда же может быть добавлена последовательность иных событий (например, регистрация оборудования, используемого для обработки контейнера или его перемещения в штабеле в целях управления терминалом). Как только контейнер перемещается в причальную зону и грузится на судно, автоматически может быть закрыт «умный контракт», заключенный на условиях Free On Board (FOB), что обусловит оплату поставщиком, поскольку будут выполнены все условия контракта, по которым дополнительно поставщик должен оплатить услуги автоперевозчика и терминального оператора. Здесь имеется возможность использования метода шифрации данных для инициирования закрытия «умного контракта», или резервирования депозита в случае неприбытия автоперевозчика или овербукинга морского перевозчика.

Судоходная линия изготавливает морской коносамент, который является обязательством с ее стороны осуществления перевозки из порта отправки в порт назначения. В него могут записывать любые дополнительные события, связанные с этим процессом: ежесуточные данные о местоположении, использование портов трансшипмента, вызывающего дополнительные операции, сведения о замене судов или даже о судоходной компании. За несколько суток до прибытия судоходная линия отправляет нотис о прибытии с указанием ожидаемого времени прибытия (ETA) через блокчейн получателю, который может начать подготовку наземной части транспортировки из порта.

В порту назначения выполняются аналогичные терминальные операции, которые также добавляются в блокчейн. Если контракт был заключен на условиях Cost Insurance Freight (CIF), то «умный контракт» автоматически инициирует оплату поставщику услуг, включая судоходную линию, терминального оператора и автоперевозчика. Как только контейнер проходит таможенную очистку, т. е. уплачиваются таможенные платежи и появляется запись в блокчейн, он становится доступным для вывоза с терминала наземным перевозчиком. Если им является железнодорожный перевозчик со своими путями на территории терминала, как в рассматриваемом здесь примере, он готовит свою железнодорожную накладную, которую добавляет в единый блокчейн. Далее последовательность операций повторяется для «последней мили», т. е. доставки автомобилем в конечный пункт назначения с соответствующим расширением блокчейн.

В пункте назначения с контейнером выполняются финальные операции (например, разгрузка и перемещение грузов в распределительный центр). После приемной инспекции, т. е. контроля поставки заказу на нее, производится выставление коммерческого инвойса. Блокчейн дополняется нужными данными, и производится оплата поставщику в случае, если в Инкотермс 2010 определяются условия контракта Carriageand Insurance Paid (CIP). Это означает завершение блокчейн, который содержит теперь полную информацию о выполненной последовательности транспортировок, интермодальных операциях и транзакциях данной интермодальной цепи.

Формы организации перевозки. В процессе материальной транспортировки действует основной экономический закон — закон масштабной экономии, заключающийся в снижении удельных затрат с ростом перевозимой транспортной партии. Действие его во многом определяет текущий облик всей транспортной индустрии, поскольку выражается в специализации и росте размеров транспортных средств всех видов транспорта [13]. Стремление использовать максимальные по вместимости транспортные средства при необходимости гарантированного использования всей провозной способности приводит к появлению трех основных форм организации перевозки: торгово-промышленной, трамповой и линейной.

Основным разграничительным признаком при выборе формы является наличие в распоряжении организатора перевозки грузов в объемах, соответствующих определенной транспортной партии. Постоянное наличие таких объемов определяет рациональность организации перевозок за счет собственных средств, т. е. использование торгово-промышленной формы. Наличие нерегулярных объемов грузов в достаточных объемах обуславливает рациональность использования трамповых (чартерных) перевозок. Наличие значительного числа мелких отправок и желание использовать эффект масштабной экономии заставляет использовать линейные формы организации перевозок, при которых задание направления и расписания движения способствует автоматическому формированию необходимых объемов. Каждая из форм организации перевозок связана со своими объемами и структурой сопроводительной и коммерческой информации.

Традиционные грузовые перевозочные документы. Приемка-сдача грузов транспортом и их перевозка информационно оформляются рядом традиционных грузовых перевозочных документов (ГПД), выполняющих строго определенные функции либо в течение всего процесса перевозки, либо на отдельных его этапах. Технологический процесс различных видов транспорта существенно отличается. Таким образом, практикой была сформирована не столь ожидаемая в настоящее время унификация, а, напротив, выработана узкая специализация видовых форм ГПД. Например, для железнодорожного транспорта — это накладная на перевозку грузов, вагонный лист, натурный лист поезда, для морского — коносамент, погрузочный ордер, штурманская расписка, люковая записка, манифест и др. Функции документов, как видно даже из их названий, не совпадают, соответственно различаются и типовые формы этих документов.

Различным образом между участниками транспортного процесса распределяются и комплекты основных ГПД (накладных). Например, на рис. 2 приведено распределение комплекта листов железнодорожной накладной на перевозку грузов в международном сообщении (RailWaybill), на рис. 3 — распределение экземпляров грузовой авианакладной [7].

Формы заключенного договора на выполнение перевозки также существенно различаются по видам транспорта. На железнодорожном и автомобильном транспорте его полностью заменяют грузовые (товарно-транспортные) накладные, на морском, напротив, существует масса типовых проформ чартеров, имеющих свою систематизацию: универсальных и специализированных, частных и рекомендованных (одобренных) [14]. Необходимо понимать, что за каждой типовой формой документа, применяемого в международном сообщении, стоит многостороннее межгосударственное соглашение, разработанное соответствующими весьма представительными международными отраслевыми транспортными организациями в ходе долгой практической деятельности. В подобных условиях какая-либо односторонняя легитимная унификация форм документов является невозможной. К тому же гипотетически унифицированный межвидовой транспортный документ неизбежно будет содержать значительное количество нефункциональных граф, вовсе невостребованных на отдельном виде транспорта, чем определяется заведомая громоздкость подобного документа.

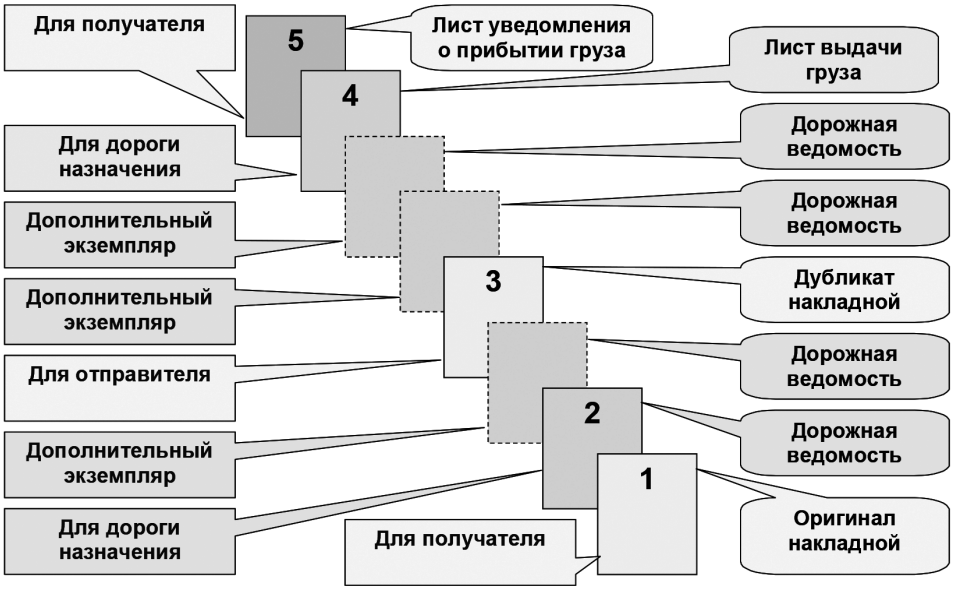


Рис. 2. Распределение комплекта листов железнодорожной накладной на перевозку грузов в международном сообщении



Рис. 3. Комплект грузовой авианакладной с указанием экземпляров, маркировок, предназначения и цветового исполнения

Использование в качестве унифицированного документа оборотного мультимодального транспортного коносамента ФИАТА (Negotiable FIATA Multimodal Transport Bill of Lading— FBL) также не представляется возможным, так как он является не грузовым, а экспедиторским документом и регулирует отношения не между грузовладельцем и фактическим перевозчиком, а между грузоотправителем и его агентом — посредником на транспортном рынке. Очевидно, что в сложившихся условиях успешная унификация ГПД в рамках цифровизации отрасли существенно

затруднена, требуется внедрение переходного варианта цифрового документа и уже на его основе необходимо формирование единого для транспортной отрасли пакета, не предусматривающего избыточной информации.

Обсуждение результатов (Discussion)

Представляется, что возможным путем цифровизации транспортной отрасли за счет определенной унификации грузовой и коммерческой информации будет введение так называемого некоторого «электронного паспорта перевозки» — документа, формируемого зарегистрированным на создаваемой электронной платформе грузоотправителем либо отечественной стороной международного договора купли-продажи (поставки) и содержащего существенные условия договора перевозки или каждого ее этапа при мультимодальной перевозке: наименование груза (оригинальное, прейскурантное и соответствующее товарной номенклатуре внешнеэкономической деятельности), вид транспорта, начальный и конечный пункты перевозки (этапа), сроки выполнения перевозки, стоимость и др. В иные ГПД, в том числе электронные, практически не изменяя согласованных их проформ, необходимо лишь добавить ссылку на оригинальный номер электронного паспорта перевозки — сквозного, действующего от начального до конечного пункта и не изменяющегося при смене вида транспорта и перевозчика, т. е. при трансшипменте. Таким образом, появляется возможность восстановления по номеру электронного паспорта перевозки всей ее истории, проводимой последовательности грузовых и коммерческих операций. Указанный паспорт сможет явиться документом, формирующим статистику перевозок по различным критериям — видам транспорта, направлениям перевозок, видам груза, сезонности. Появляется возможность объективного контроля грузонапряженности отдельных транспортных направлений и узлов. Становится возможной для анализа динамика стоимостей перевозок. Некий действующий аналог указанного документа (паспорт сделки) является документом валютного контроля, не способным поддерживать необходимую транспортную информацию.

Следует отметить, что введение подобного документа может показаться избыточным при переходе на чисто электронные блокчейн-технологии. В то же время указанный документ позволяет создавать сквозные цепочки документов, во многом соответствующие идее блокчейн, для любой комбинации электронных и бумажных документов, равно как и для разной степени полноты комплекта этих документов, тем самым никак не препятствуя идее внедрения блокчейн-технологии, это решение позволяет уже сегодня обеспечить декларируемый, но не реализованный и столь ожидаемый атрибут интермодализма, как единый сквозной комплект документов.

Заключение (Conclusions)

Таким образом, в результате проведенного исследования установлено:

– актуализация перспективного направления повышения эффективности и обеспечения доступности транспортной отрасли возможна на основе декомпозиции потоковых процессов в транспортном пространстве;

– транспортное пространство является неоднородным, структурированным по слоям, соответствующим как этапам, так и характеру обеспечивающих потоков;

– этим же обусловлено объективно сложившееся и документально зафиксированное разнообразие баз данных и проформ документов, обеспечивающих прохождение процессов в транспортном пространстве, в основном различающихся по видам транспорта;

– перспективным шагом на пути цифровизации транспортной отрасли может явиться введение промежуточного электронного документа — паспорта перевозки, предваряющего повсеместный переход к блокчейн-технологиям.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Прогноз долгосрочного социально-экономического развития Российской Федерации на период до 2030 года. М.: Минэкономразвития России, 2013.

2. Стратегия развития информационного общества в Российской Федерации на 2017-2030 годы (утв. Указом Президента Российской Федерации от 9 мая 2017 г. № 203).

3. Программа «Цифровая экономика Российской Федерации» (утв. распоряжением Правительства Российской Федерации от 28 июля 2017 г. № 1632-р).

4. Транспортная стратегия Российской Федерации на период до 2030 года (утв. распоряжением Правительства Российской Федерации от 22 ноября 2008 г. № 1734-р, в редакции от 11 июня 2014 г. № 1032-р).

5. Стратегия развития железнодорожного транспорта в Российской Федерации до 2030 года (утв. распоряжением Правительства Российской Федерации от 17 июня 2008 г. № 877-р).

6. Стратегия развития внутреннего водного транспорта Российской Федерации на период до 2030 года (утв. распоряжением Правительства Российской Федерации от 29 февраля 2016 г. № 327-р).

7. *Изотов О. А.* Внешнеторговые операции и их транспортное обеспечение / О. А. Изотов, А. В. Кириченко, О. В. Соляков. — СПб.: Изд-во ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова, 2013. — 421 с.

8. *De Oliveira L.K.* Simulation of an Urban Logistic Space for the Distribution of Goods in Belo Horizonte, Brazil / L. K.de Oliveira, B. R. P. e Oliveira, V. de Assis Correia// Procedia–Social and Behavioral Sciences. — 2014. — Vol. 125. — Pp. 496–505. DOI: 10.1016/j.sbspro.2014.01.1491.

9. *Rodrigue J.-P.* The Geography of Transport Systems / J-P Rodrigue, C. Comtois, B. Slack. — Fourth Edition. — New York: Routledge, 2017. — 440 p.

10. *Stalmašeková N.* The Impact of Using the Digital Environment in Transport / N. Stalmašeková, T. Genzorová, T. Čorejová, L. Gašperová // Procedia Engineering. — 2017. — Vol. 192. — Pp. 231–236. DOI: 10.1016/j.proeng.2017.06.040.

11. *Rodrigue J.-P.* Transportation and the Internet / J.-P. Rodrigue // The SAGE Encyclopedia of the Internet, edited by B. Warf. — London: SAGE, 2018. — Pp. 875–878.

12. *Yap M.* Workshop 8 report: Big data in the digital age and how it can benefit public transport users / M. Yap, M. Munizaga // Research in Transportation Economics. — 2018. DOI: 10.1016/j.retrec.2018.08.008 (Inpress).

13. *Кузнецов А.Л.* Морская контейнерная транспортно-технологическая система: монография / А. Л. Кузнецов [и др.]. — СПб.: Изд-во МАНЭБ, 2017. — 320 с.

14. Проформы чартеров и коносаментов (2-М). Кн. 1–12 / под ред. В. В. Пузырёва. — СПб.: Изд-во «ЦНИИМФ», 1994–2005.

REFERENCES

1. Prognoz dolgosrochnogo sotsial'no-ekonomicheskogo razvitiya Rossiiskoi Federatsii na period do 2030 goda. Minekonomrazvitiya Rossii, 2013.

2. Strategiya razvitiya informatsionnogo obshchestva v Rossiiskoi Federatsii na 2017–2030 gody.

3. Programma «Tsifrovaya ekonomika Rossiiskoi Federatsii».

4. Transportnaya strategiya Rossiiskoi Federatsii na period do 2030 goda.

5. Strategiya razvitiya zheleznodorozhnogo transporta v Rossiiskoi Federatsii do 2030 goda.

6. Strategiya razvitiya vnutrennego vodnogo transporta Rossiiskoi Federatsii na period do 2030 goda.

7. Izotov, O. A., A. V. Kirichenko, and O. V. Solyakov. *Vneshnetorgovye operatsii i ikh transportnoe obespechenie*. SPb.: Izd-vo GUMRF imeni admirala S. O. Makarova», 2013.

8. De Oliveira, Leise Kelli, Bárbara Regina Pinto e Oliveira, and Vagner de Assis Correia. "Simulation of an Urban Logistic Space for the Distribution of Goods in Belo Horizonte, Brazil." *Procedia-SocialandBehavioralSciences* 125 (2014): 496–505. DOI: 10.1016/j.sbspro.2014.01.1491.

9. Rodrigue, Jean-Paul, Claude Comtois, and Brian Slack. *The Geography of Transport Systems.*4th Edition. New York: Routledge, 2017.

10. Stalmašeková, Natália, Tatiana Genzorová, Tatiana Čorejová, and Lucia Gašperová. "The impact of using the digital environment in transport." *Procedia engineering* 192 (2017): 231–236. DOI: 10.1016/j.proeng.2017.06.040.

11. Rodrigue, J.-P. "Transportation and the Internet." *The SAGE Encyclopedia of the Internet.* Edited by B. Warf. London: SAGE, 2018. 875–878.

12. Yap, Menno, and Marcela Munizaga. "Workshop 8 report: Big data in the digital age and how it can benefit public transport users." *Research in Transportation Economics* (2018). DOI: 10.1016/j.retrec.2018.08.008 (In press).

13. Kuznetsov, A. L., A. V. Kirichenko, et al. *Morskaya konteinernaya transportno-tekhnologicheskaya sistema: monografiya*. SPb.: Izd-vo MANEB, 2017.

14. Puzyreva, V. V., eds. *Proformy charterov i konosamentov (2-M). Kn. 1–12*. SPb.: Izdatel'stvo TsNIIMF, 1994–2005.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

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

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

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

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

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

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

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

Статья поступила в редакцию 28 ноября 2018 г.
Received: November28, 2018.

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

DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-6-1191-1199

ANALYSIS OF TECHNICAL CHARACTERISTICS AT THE SELECTION OF BALLAST WATER TREATMENT SYSTEMS FOR VESSELS OF MIXED NAVIGATION AREA

Y. N. Andryushechkin, D. Y.Stolpovskii, S. V. Rudy'kh

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

The article deals with the problem of preventing the transfer of invasive marine organisms with ballast waters of ships into various sea and river areas and the issues of equipping ships of a mixed navigation area with efficient shipboard ballast water treatment systems based on their performance parameters and overall parameters, safety for crew members and ship structures in accordance with the requirements of the International Convention for the Control and Management of Ship's Ballast Water and Sediments.

The study analyzed the standards of the International Convention for the Control and Management of Ballast Water and Sediments of 2017, regulating the replacement and quality of ballast water during operation and construction of sea and river vessels - D-1 and D-2.

In accordance with the rules of the Convention, the main methods and methods of treatment of seawater are presented by means of physical, mechanical and chemical effects, in order to determine the effectiveness of the impact of these methods on invasive organisms contained in ballast waters. The current technologies of physical and chemical disinfection of ballast with chlorine and ultraviolet radiation in modern developments are presented; their effectiveness is evaluated when used together with the method of mechanical filtration. The analysis of the technical characteristics of the modern development of shipboard ballast processing systems approved by the International Maritime Organization, determining their performance criteria has been made.

The results of this study is to determine the most relevant methods for processing shipboard ballast used in modern seawater treatment systems onboard a ship, the ranges of allowable processing equipment capacity in accordance with the limited weight and dimensions required for the possible installation of cleaning equipment on ships of a mixed navigation area in accordance with the requirements and the rules of the International Convention for the Control and Management of Ship's Ballast Water and Sediments. The study presented the main criteria for the selection of ballast treatment systems for river-sea vessels sailing.

Keywords: ballast water, ballast treatment systems, environmental pollution, treatment methods, filtration, convention, shipping.

For citation:
Andryushechkin, Yuri N., Dmitrii Y. Stolpovskii, and Sergey V. Rudy'kh. "Analysis of technical characteristics at the selection of ballast water treatment systems for vessels of mixed navigation area." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova* 10.6 (2018): 1191–1199. DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-6-1191-1199.

УДК 629.122

АНАЛИЗ ТЕХНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПРИ ВЫБОРЕ СИСТЕМ ОБРАБОТКИ БАЛЛАСТНЫХ ВОД ДЛЯ СУДОВ «РЕКА – МОРЕ» ПЛАВАНИЯ

Ю. Н. Андрюшечкин, Д. Ю. Столповский, С. В. Рудых

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

В статье рассматривается проблема предотвращения переноса инвазивных морских организмов балластными водами судов в различные морские и речные акватории и вопросы технического оснащения судов смешанного района плавания эффективными судовыми системами обработки балластных вод исходя из их параметров производительности и габаритных показателей, безопасности для членов экипажа и судовых

конструкций в соответствии с требованиями «Международной Конвенции о контроле судовых балластных вод и осадков и управлении ими». В исследовании выполнен анализ стандартов «Международной Конвенции о контроле и управлении балластными водами и осадками 2017 года», регулирующих замену и качество балластных вод при эксплуатации и постройке морских и речных судов D-1 и D-2. В соответствии с правилами этой Конвенции, представлены основные методы и способы обработки забортной воды с помощью физического, механического и химического воздействия с целью определения эффективности воздействия данных методов на инвазивные организмы, содержащиеся в балластных водах. Представлены актуальные технологии физической и химической дезинфекции балласта хлором и ультрафиолетовым излучением в современных разработках, выполнена оценка их эффективности при совместном использовании этих технологий с методом механической фильтрации. Произведен анализ технических характеристик современных разработок систем обработки судового балласта, одобренных Международной морской организацией (IMO), определяющих критерии их эффективности. Результатами данного исследования является определение наиболее актуальных методов обработки судового балласта, используемых в современных системах очистки забортной воды на борту судна, диапазонов допустимой мощности оборудования обработки в соответствии с ограниченными массогабаритными показателями, принятыми для возможной установки оборудования очистки на суда смешанного района плавания в соответствии с требованиями и правилами «Международной Конвенции о контроле судовых балластных вод и осадков и управлении ими». В исследовании приведены основные критерии выбора систем обработки балласта для судов «река – море» плавания.

Ключевые слова: балластные воды, системы обработки балласта, экологическое загрязнение, методы обработки, фильтрация, конвенция, судоходство.

Для цитирования:
Андрюшечкин Ю. Н. Анализ технических характеристик при выборе систем обработки балластных вод для судов «*река – море*» плавания / Ю. Н. Андрюшечкин, Д. Ю. Столповский, С. В. Рудых // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2018. — Т. 10. — № 6. — С. 1191–1199. DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-6-1191-1199.

Введение (Introduction)

В настоящее время одной из важных проблем обеспечения экологической безопасности является проблема предотвращения переноса чужеродных микроорганизмов и растений в неестественные для их обитания акватории балластными водами судов. Такой вид загрязнения, в отличие от других, несет необратимый характер, являющийся угрозой для биологического разнообразия различных экологических систем. По мере увеличения трафика в морском и речном судоходстве значение переноса инвазивных микроорганизмов увеличивается. Таким образом, любое судно является потенциально опасным источником экологической опасности [1]. Данная проблема порой грозит полным вымиранием различных видов флоры и фауны. С целью обеспечения экологической безопасности Международной морской организацией была разработана «Международная Конвенция о контроле балластных вод и осадков и управлении ими» (далее — Конвенция), в соответствии с которой принявшие этот документ страны обязуются обеспечивать безопасность перевозки балласта в соответствии с принятыми стандартами [3].

Ежегодно суда перевозят приблизительно 10–12 млрд балластной воды. Такое перемещение судового балласта из одних морских и речных бассейнов в другие приводит к неконтролируемому размножению чужеродных видов животных и растительных организмов, вытесняющих местные организмы из собственной среды обитания, нарушая тем самым природный экологический баланс системы той или иной акватории. Это «биологическое загрязнение» в ряде случаев приводит к самым серьезным экологическим, экономическим и социальным последствиям [2]. Таким образом, обработка и мониторинг балластных вод судов являются на сегодняшний день единственным актуальным решением данной экологической проблемы.

Целью данного исследования являлось обоснование основных характеристик, технических составляющих методов и способов обработки балластной воды от инвазивных морских организмов на борту судна, а также разработка критериев, необходимых для рационального выбора системы обработки балластных вод для судов «*река – море*» плавания с целью предотвращения переноса различных инвазивных организмов в соответствии с требованиями и стандартами для морских и речных судов D-1 и D-2 Конвенции.

Методы и материалы (Methods and Materials)

Прием балласта является неотъемлемой частью обеспечения безопасности мореплавания судна. Балластная система на судне служит для изменения осадки и дифферента судна, обеспечивающих необходимую остойчивость судна при перевозке грузов или плавании судна порожнем. Однако смена балласта влечет за собой ряд негативных и неконтролируемых процессов, связанных с переносом инвазивных организмов, а использование стандартных балластных систем не обеспечивает предотвращение загрязнения акваторий такими микроорганизмами. Развитие инвазивных микроорганизмов является значительной угрозой как для вод всего Мирового океана, так и для экологической безопасности России. В связи с этим международное сообщество выпустило в конце XX в. ряд руководств и рекомендаций по контролю качества балластных вод, а в 2004 г. Международная морская организация (IMO) приняла «Конвенцию по контролю и управлению балластными водами и осадками» (International Convention for the Control and Management of Ships Ballast Water and Sediments). Этот документ окончательно вступил в силу 8 сентября 2017 г. Таким образом, все страны, ратифицирующие данную Конвенцию, должны принять меры для предотвращения загрязнения балластными водами способом замены или обработки судового балласта. Суда, плавающие под флагом страны, принявшей Конвенцию, должны иметь на борту судна специальные системы очистки судового балласта, одобренные Международной морской организацией (IMO), за исключением судов, которые используют способ сброса балласта на расстоянии 200 миль от берега или в приемные сооружения. Конвенция содержит два основных стандарта: D-1 — стандарт, регулирующий замену балластных вод, и стандарт D-2 — стандарт, регулирующий качество балластных вод [3]. Теперь страны, исполняющие обязательства данной Конвенции, должны руководствоваться стандартами D-1 и D-2 как при эксплуатации, так и при постройке новых судов.

Ранее основным способом защиты морской среды от подобных загрязнений являлась замена балластных вод в нейтральных водах, перед заходом в порт, не менее 95 % объема старого балласта на новый. В итоге этот способ был признан IMO неэффективным для обеспечения предотвращения переноса инвазивных микроорганизмов. На данный момент наиболее актуальным способом обработки воды является очистка балластной воды на борту судна с использованием механических, физические и химические методов. Согласно принятой Конвенции, все суда должны иметь на борту специализированные системы очистки судового балласта, кроме судов, которые изначально не были сконструированы для принятия жидкого балласта. Данное оборудование должно быть сертифицировано и одобрено Международной морской организацией (IMO), классификационными обществами и властями флага. Тем не менее возникает вопрос рационального выбора судовладельцем соответствующих систем обработки для судов, так как следует подобрать наиболее безопасную систему как для обеспечения предотвращения загрязнения моря, так и для безопасности судна и членов экипажа.

Результаты (Results)

Изучив материалы работы [4] и [5], следует отметить, что современные системы обработки судового балласта являются совокупностью различных технических составляющих, включающих работу нескольких основных блоков: механической фильтрации и дезинфекции (рис. 1).



Рис. 1. Типовая схема обработки балластных вод

Механическая фильтрация представляет собой предварительную очистку с помощью различных фильтров и мультигидроциклонов, которая не позволяет попадать и оседать в балластных

танках морским организмам и растениям. Пропускная способность таких фильтров, как правило, не превышает 50 мкм [6]. Проанализировав доступные на рынке системы обработки балласта, одобренные IMO, можно сделать вывод о том, что в комплексе механической фильтрации преобладающей технологией очистки является использование фильтров за счет их быстрой работы, размеров и простоты их эксплуатации и замены.

В работе [7] следующим этапом обработки выделяется сегмент дезинфекции, включающий обработку балласта, который служит для окончательного уничтожения микробов и вирусов, а также спор растений с помощью различных способов: обработки ультрафиолетом, электролиза, озонирования, хлорирования и бромирования. Такая обработка подразделяется на два основных метода: химический и физический (табл. 1).

Таблица 1

Методы обработки балластных вод

Методы обработки		
Механические	Физические	Химические
Фильтрация Использование мультигидроциклонов	Обработка ультрафиолетом Обработка ультразвуком Электролиз Озонирование Нагревание	Электрохлорирование Обработка диоксидом хлора Обработка переоксидом водорода Обработка гипохлоритом натрия Обработка хлорной кислотой

В настоящее время использование технологий обработки хлором и ультрафиолетовым облучением являются наиболее распространенными среди производителей. Обработка хлором происходит при приеме балласта в систему проточным способом. Хлор на судне получают вследствие протекания процесса электролиза. Время пагубного воздействия не превышает четырех часов. При этом данный способ химической обработки имеет такой существенный недостаток, как появление коррозии металла, что, в свою очередь, из-за высокой концентрации, может привести к разрушению металлических танков балластной системы судна [8].

Ультрафиолетовое облучение используется в большинстве случаев с механическим способом обработки — фильтрацией. После того как забортная вода прошла первую ступень очистки фильтрами, судовой балласт подвергается ультрафиолетовому излучению, вследствие чего образуются гидроксильные радикалы, которые окончательно поражают оставшиеся после фильтрации микроорганизмы [9]. Поражающее действие данного способа действует только в течение процесса обработки, не оказывая разрушительного воздействия на конструкции балластной системы судна.

Авторы данной статьи, проанализировав доступные на рынке системы обработки балласта [10], одобренные IMO, сделали вывод о том, что в комплексе механической фильтрации преобладающей технологией очистки является использование фильтров за счет их быстрой работы, размеров и простоты их эксплуатации и замены. Также следует отметить, что такие способы дезинфекции, как использование физического метода обработки ультрафиолетовыми волнами или химического метода хлорирования, являются в настоящее время наиболее востребованными (рис. 2).

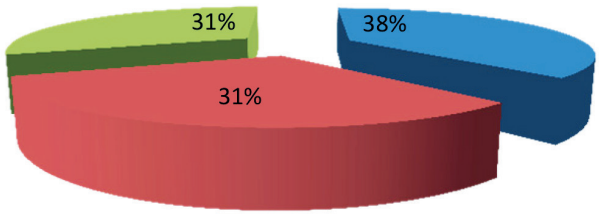


Рис. 2. Востребованые методы обработки балласта:
Условные обозначения: синий сегмент — использование УФ-излучения;
красный сегмент — обработка хлором; зеленый сегмент — другие способы

Физический метод обработки балластных вод ультрафиолетовым излучением используются в следующих разработках: «GloEn-PatrolTM Ballast», «Resource Ballast Technologies», «Desmi», «HydeMarine», «AquaTriComb». Химический метод обработки балластных вод процессом хлорирования используется следующими разработчиками: «Hyndai Heavy Indusries», «Blue Ocean Shield», «Ecochlor»; «OceanSaver»; «RWO».

Таким образом, авторы данного исследования при рассмотрении различных методов механической, физической и химической обработки судового балласта выделяют обработку ультрафиолетовым облучением и хлорирование за счет их максимальной безопасности для членов экипажа судна и судовых конструкций, высокой производительности и возможности интегрирования на суда смешанного района плавания при небольшой занимаемой площади и потребляемой мощности, без значительных конструктивных воздействий на корпус и судовые системы судна.

Обсуждение (Discussion)

На рынке представлено большое количество систем обработки балластных вод, в которых используются различные технологии обработки судового балласта, предназначенные для решения проблемы перевозки инвазивных организмов в различные акватории. В настоящее время актуальным является вопрос оснащения судов плавания «*река – море*» системами обработки балластных вод, из-за невозможности замены балластных вод в 200 милях от берега, ввиду их небольшой автономности плавания. Из-за конструктивных особенностей таких судов, является невозможной установка систем обработки больших размеров. Однако в настоящее время на рынке появляются системы с достаточной для судов плавания «*река – море*» производительностью и небольшой занимаемой площадью. Анализ систем с достаточной производительностью до 400 м^3/ч показал, что площадь, занимаемая такими системами, составляет от 0,8 м^2 до 15 м^2. Далее приведен сравнительный анализ судовых очистных систем с возможностью интегрирования на суда смешанного района плавания, использующих разные методы обработки забортной воды.

Система «PureBallast 3.1», изготовленная компанией «AlfaLaval», — компактная система, предназначенная для обработки балластной воды, одобренная IMO и береговой охраной США (рис. 3). Данная система использует два этапа очистки забортной воды: фильтрацию и обработку ультрафиолетовыми лучами. Представленная модель состоит из нескольких компонентов: системы фильтров и реактора с ультрафиолетовыми лампами, а также блока управления системой. Принцип действия такой системы заключается в том, что при приеме забортной воды происходит первый этап очистки через систему фильтров, которые имеют механизм, предназначенный для самоочистки. После механической обработки фильтрами вода попадает в реактор с ультрафиолетовыми лампами, в котором происходит окончательный этап дезинфекции забортной воды — обработка ультрафиолетовым излучением. Самоочистка фильтров в этой модели осуществляется автоматически после приема балласта и занимает приблизительно 20 мин. Данная система имеет производительность 32–300 м^3/ч при занимаемой площади 2,3 м^2, потребляемая мощность составляет от 20–30 кВт [11]. Данная модель может быть интегрирована на любое судно, в том числе и на суда *река – море* плавания и не имеет сложностей в ее обслуживании.



Рис. 3. Система очистки балластных вод методом фильтрации и обработкой УФ-излучением «PureBallast 3.1»

«Ecochlor Series 75» — это модель американской компании Ecochlor, разработанная для обработки забортной воды с помощью системы фильтров и диоксидом хлора (рис. 4). Первая ста-

дия обработки состоит из системы двух фильтров средней и грубой очистки 100 мкм и 50 мкм соответственно. Далее в специальной смесительной вакуумной камере образуется диоксид хлора, после чего в воду, прошедшую предварительную фильтрацию, подается диоксид хлора. Данная модель — одна из небольших систем, предназначенная для обработки воды хлором с пропускной способностью 400 м^3/ч [12]. Однако за счет объема танков для обработки воды площадью 1,5 м^2 и камеры для получения диоксида хлора площадью 1,3 м^2 можно сделать вывод о том, что подобные системы являются еще крупногабаритными для судов *река – море* плавания. Установка подобной системы на суда *река – море* практически возможна, но более актуальным типом систем являются системы с технологией обработки ультрафиолетом, которые занимают приблизительно в 1,5–2 раза меньше площади, при этом не уступая системам с хлором в производительности и безопасности.



Рис. 4. Система очистки балластных вод
методом фильтрации и хлорирования «Ecochlor Series 75»

Каждая из проанализированных систем соответствует требованиям Конвенции и одобрена IMO, а также может быть использована для обработки балластных вод на судах *река – море* плавания. Любая установка очистки должна соответствовать требованиям Конвенции и иметь основное и окончательное одобрения IMO [13]. Выбирая систему для любого типа судна, следует обратить внимание на следующие критерии: производительность, габаритные показатели и воздействие на морскую среду и здоровье экипажа.

Критерий производительности является одним из основополагающих при выборе системы для судов с большой зависимостью от балласта (например, танкеры и балкеры, которые часто выполняют свои морские переходы в балласте и без груза). В настоящее время существуют системы производительностью более 10000 м^3/ч, необходимая мощность которых может достигать до 200 кВт на 1000 м^3/ч производительности, что в свою очередь, является энергозатратным процессом и может потребовать установки дополнительных дизель-генераторов. В случае судов *река – море* следует отметить, что за счет своих небольших размеров балласта, требуемого для поддержания достаточной остойчивости будет меньше, чем на морских судах, следовательно, для данного типа судов достаточной будет установка подобных систем.

Анализ габаритных показателей оборудования производительностью до 400 м^3/ч показал, что полная площадь, занимаемая установкой, составляет 0,8–15,0 м^2. Анализ систем «PureBallast» и «Ecochlor» показал, что система с технологией обработки ультрафиолетовым излучением имеет меньшую занимаемую площадь. Таким образом, следует обратить внимание на то, что на габаритные показатели оказывает влияние выбор технологии, используемой в данной системе.

Сопоставляя различные системы обработки, необходимо обратить внимание на возможное негативное воздействие на здоровье членов экипажа. Экипаж должен иметь соответствующую подготовку для обслуживания подобных систем. На судне должны соблюдаться требования по-

жарной безопасности и быть отработаны действия в случае утечки химических веществ из систем обработки балласта. В дополнение к рассматриваемой Конвенции IMO было разработано «Руководство по обеспечению безопасного использования и хранения химических веществ и препаратов, используемых при обработке балластных вод, и выполнялась разработка процедур безопасности по снижению рисков для судна и экипажа в результате процесса обработки» [14].

Заключение (Conclusion)

При рассмотрении различных методов обработки судового балласта наиболее актуальными способами являются обработка ультрафиолетовым облучением и хлорирование. Данные методы являются наиболее перспективными за счет возможности интегрирования их в балластные системы судов смешанного *река – море* плавания.

Выбор системы очистки судовладельцем для судов *река – море* должен быть основан на следующих критериях, исходя из специфики данного типа судов:

– минимальное энергопотребление

– минимальные габаритные параметры (ввиду ограниченного места для размещения при достаточной производительности).

– безопасность для членов экипажа и судовых конструкций при обслуживании данных систем.

Разрушение различных экологических систем биологическими инвазиями является серьезной биологической проблемой, а решение непосредственно находится в качественном и безопасном управлении судовым балластом при использовании новейших инженерных решений. Следует тщательно относиться к вопросу рационального выбора систем обработки забортной воды: проводить тщательный анализ существующих решений обработки, а также разрабатывать усовершенствованные методы фильтрации и дезинфекции, требующие минимального вмешательства в конструктивные особенности судов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Андрюшечкин Ю. Н.* Анализ методов и способов управления балластными водами судов / Ю. Н. Андрюшечкин, А. К. Гусев, Д. Ю. Столповский // European scientific conference: сборник статей IX Международной научно-практической конференции: в 2 ч. — Пенза: МЦНС «Наука и Просвещение», 2018. — Ч. 1. — С. 107–110.

2. *Castro M. C. T.* Ten years of ballast water management / M. C. T. Castro, J. M. Hall-Spencer, C. F. Poggian, T. W. Fileman // Journal of Sea Research. — 2018. — Vol. 133. — Pp. 36–42. DOI: 10.1016/j.seares.2017.02.003.

3. Международная конвенция о контроле судовых балластных вод и осадков и управлении ими. — СПб.: ЗАО ЦНИИМФ, 2005. — 120 с.

4. *Диденко М. А.* Повышение эффективности управления балластными водами на судах морского и речного флота / М. А. Диденко, А. Л. Боран-Кешишьян, С. И. Кондратьев // Эксплуатация морского транспорта. — 2015. — № 4 (77). — С. 31–39.

5. *First M. R.* Life after treatment: detecting living microorganisms following exposure to UV light and chlorine dioxide / M. R. First, L. A. Drake // Journal of applied phycology. — 2014. — Vol. 26. — Is. 1. — Pp. 227–235. DOI: 10.1007/s10811-013-0049-9.

6. *Wright D. A.* Alternative, indirect measures of ballast water treatment efficacy during a shipboard trial: a case study / D. A. Wright, N. A. Welschmeyer, L. Peperzak // Journal of Marine Engineering & Technology. — 2015. — Vol. 14. — Is. 1. — Pp. 1–8. DOI: 10.1080/20464177.2015.1022379.

7. *Леонов В. Е.* Балластные воды в судоходстве: глобальная экологическая проблема / В.Е. Леонов, Я.В. Ермоленко // Sciences of Europe. — 2016. — № 1(1). — С. 80–87.

8. *Горбов В. М.* Анализ технико-экономических показателей при выборе систем обработки балласта / В. М. Горбов, В. С. Митенкова // Морський та річковий транспорт. — 2014. — № 2 (11). — С. 28–38.

9. *Bakalar G.* Comparisons of interdisciplinary ballast water treatment systems and operational experiences from ships / G. Bakalar // Springer Plus. — 2016. — Vol. 5. — Is. 1. — Pp. 1–12. DOI: 10.1186/s40064-016-1916-z.

10. *Мизгирев Д. С.* Современные способы и системы обработки судовых балластных вод / Д. С. Мизгирев, А. С. Курников // Вестник Волжской государственной академии водного транспорта. — 2013. — № 37. — С. 190–198.

11. Alfa Laval PureBallast 3.1 Compact [Электронный ресурс]. — Режим доступа: https://www.alfalaval.com/globalassets/documents/products/process-solutions/ballast-water-solutions/alfa-laval-pureballast-3-1-compact.pdf (дата обращения: 28.04.2018).

12. Ecochlor [Электронный ресурс]. — Режим доступа: http://ecochlor.com/treatment/ (дата обращения: 23.04.2018).

13. Annex 4. Resolution MEPC. 174(58). Guidelines for approval of ballast water management systems (G8). — International Maritime Organization (IMO), 2008. — 28 p.

14. Guidance to ensure safe handling and storage of chemicals and preparations used to treat ballast water and the development of safety procedures for risks to the ship and crew resulting from the treatment process. — International Maritime Organization (IMO), 2004.

REFERENCES

1. Andryushechkin, Y. N., A. K. Gusev, and D. Y. Stolpovskii. “Analysis of management methods of ship ballast waters.” *European scientific conference: sbornik statei IX Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii. V 2 ch. Ch.1.* Penza: MTsNS «Nauka i Prosveshchenie», 2018. 107–110.

2. Castro, M. C. T., J. M. Hall-Spencer, C. F. Poggian, and T.W. Fileman. “Ten years of ballast water management.” *Journal of Sea Research* 133 (2018): 36–42. DOI: 10.1016/j.seares.2017.02.003.

3. *Mezhdunarodnaya konventsiya o kontrole sudovykh ballastnykh vod i osadkov i upravlenii imi.* SPb.: ZAO TsNIIMF, 2005.

4. Didenko, M. A., A. L. Boran-Keshish’yan, and S. I. Kondrat’ev. “Actual The efficiency increase in the ballast water treatment of sea and river ships.” *Ekspluatatsiya morskogo transporta* 4(77) (2015): 31–39.

5. First, Matthew R., and Lisa A. Drake. “Life after treatment: detecting living microorganisms following exposure to UV light and chlorine dioxide.” *Journal of applied phycology* 26.1 (2014): 227–235. DOI: 10.1007/s10811-013-0049-9.

6. Wright, D. A., N. A. Welschmeyer, and L. Peperzak. “Alternative, indirect measures of ballast water treatment efficacy during a shipboard trial: a case study.” *Journal of Marine Engineering & Technology* 14.1 (2015): 1–8. DOI: 10.1080/20464177.2015.1022379.

7. Leonov, V. Ye., and Ya. V. Yermolenko. “Ballast water in shipping: global ecological problem.” *Sciences of Europe* 1-1 (2016): 80–87.

8. Gorbov, V. M., and V. S. Mitenkova. “Analiz tekhniko-ekonomicheskikh pokazatelei pri vybore sistem obrabotki ballasta.” *Mors’kii ta richkovii transport* 2(11) (2014): 28–38.

9. Bakalar, Goran. “Comparisons of interdisciplinary ballast water treatment systems and operational experiences from ships.” *SpringerPlus* 5.1 (2016): 1–12. DOI: 10.1186/s40064-016-1916-z.

10. Mizgirev, D. S., and A. S. Kurnikov. “Modern methods and systems for ballast water treatment.” *Vestnik VGAVT* 37 (2013): 190–198.

11. Alfa Laval PureBallast 3.1 Compact. Web. 28 Apr. 2018 <https://www.alfalaval.com/globalassets/documents/products/process-solutions/ballast-water-solutions/alfa-laval-pureballast-3-1-compact.pdf>.

12. Ecochlor. Web. 23 Apr. 2018 <http://ecochlor.com/treatment/>.

13. *Annex 4. Resolution MEPC. 174(58). Guidelines for approval of ballast water management systems (G8).* International Maritime Organization (IMO), 2008.

14. *Guidance to ensure safe handling and storage of chemicals and preparations used to treat ballast water and the development of safety procedures for risks to the ship and crew resulting from the process.* International Maritime Organization (IMO), 2004.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Андрюшечкин Юрий Николаевич —
кандидат технических наук, доцент
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала С.О. Макарова»
198035, Российская Федерация, Санкт-Петербург, ул. Двинская, 5/7
e-mail: *andryshechkin_y@mail.ru*, *kaf_svvp@gumrf.ru*

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Andryushechkin, Yuri N. —
PhD, associate professor
Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping
5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg, 198035, Russian Federation
e-mail: *andryshechkin_y@mail.ru*, *kaf_svvp@gumrf.ru*

Столповский Дмитрий Юрьевич — аспирант
Научный руководитель:
Андрюшечкин Юрий Николаевич
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала
С. О. Макарова»
198035, Российская Федерация, Санкт-Петербург,
ул. Двинская, 5/7
email: *dimkadimkin182@gmail.com*,
kaf_svvp@gumrf.ru
Рудых Сергей Витальевич —
доктор технических наук
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала
С. О. Макарова»
198035, Российская Федерация, Санкт-Петербург,
ул. Двинская, 5/7
e-mail: *kaf_svvp@gumrf.ru*

Stolpovskii, Dmitrii Y. — Postgraduate
Supervisor:
Andryushechkin, Yuri N.
Admiral Makarov State University of Maritime
and Inland Shipping
5/7 Dvinskaya Str. St. Petersburg 198035,
Russian Federation
email: *dimkadimkin182@gmail.com*,
kaf_svvp@gumrf.ru
Rudy'kh, Sergey V. —
Doctor of Technical Sciences
Admiral Makarov State University of Maritime
and Inland Shipping
5/7 Dvinskaya Str. St. Petersburg 198035,
Russian Federation
e-mail: *kaf_svvp@gumrf.ru*

Статья поступила в редакцию 15 ноября 2018 г.
Received: November 15, 2018.

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

DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-6-1200-1210

USING A SITUATION AWARENESS THEORY IN A STUDY OF GROUNDING INCIDENT INVESTIGATIONS

A. A. Zhmur, V. A. Loginovsky

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

Groundings of ships are considered to be a third major category of accidents in worldwide shipping. The study has an aim to provide more deeper understanding of underlying factors of this type of accidents, using the situation awareness approach. The study has examined data from 38 accident reports on grounding accidents in the waters of Canada, USA and Australia during the period of 2007–2017. The initial analysis of these cases pointed out that the situation awareness concept might be useful for providing more clear understanding of processes and events that lead to grounding accidents. In the context of this research the situation awareness is defined as 'being aware of what is happening around the ship in this moment and understanding what the navigational information means to for the bridge team now and in the future'. The first part of study contains the analysis of accident reports that have been retrieved from open source databases of governmental institutions that provide maritime accident investigations. Results of the study reveal that vessel grounding accidents in 29 of 38 cases associated with the human error phenomenon and, in turn, accidents caused by a human error were preceded by loss of situation awareness in all of 29 instances. In the second part of this study three types of situation awareness failures preceding accidents were identified. They are failures to perceive the situation correctly, failures to comprehend it correctly, and failures to project the situation into the future. The influence of different types of situation awareness failures on each level regarding grounding accidents was researched.

Keywords: situation awareness, mental model, safety of navigation, accident investigation reports, confined waters, grounding.

For citation:
Zhmur, Andrew A., and Vladimir A. Loginovsky. "Using a situation awareness theory in a study of grounding incident investigations." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 10.6 (2018): 1200–1210. DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-6-1200-1210.

УДК 656.61.052

ПРИМЕНЕНИЕ ТЕОРИИ ВЛАДЕНИЯ СИТУАЦИЕЙ ПРИ ИЗУЧЕНИИ ОТЧЕТОВ О РАССЛЕДОВАНИИ СЛУЧАЕВ ПОСАДКИ СУДОВ НА МЕЛЬ

А. А. Жмур, В. А. Логиновский

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

Установлено, что посадки судов на мель занимают третью позицию по распространенности среди аварийных случаев, имеющих место в мореплавании. Настоящая статья имеет своей целью углубить понимание сопутствующих обстоятельств данного типа аварий с точки зрения принципов владения навигационной ситуацией командой мостика судна. В исследовании проанализированы данные, полученные из 38 отчетов о расследовании посадок судов на мель в водах Канады, США и Австралии в период 2007 – 2017 гг. Предварительный анализ данных из этих отчетов показал, что для лучшего понимания процессов и явлений, ведущих к подобного рода авариям, может быть применима концепция владения ситуацией. Под термином «владение ситуацией» понимается «состояние осведомленности о том, что происходит вокруг судна в данный интервал времени, понимание смысла информации, воспринимаемой командой мостика в текущий момент и эффективное прогнозирование развития ситуации в некотором интервале времени и пространства». Первая часть настоящего исследования содержит анализ отчетов о расследовании аварий, которые были получены из баз открытого доступа государственных организаций, уполномоченных для расследования аварий на море. Результаты исследования показали, что посадки судов на мель почти в 80 % случаев связаны с феноменом человеческой ошибки. Во второй части исследования описаны типы сбоев во владении навигационной ситуацией команды мостика, обнаруженные при анализе данных

посадок судов на мель. Это сбои, которые были обнаружены в восприятии данных о ситуации, а также в понимании текущей ситуации и в адекватном прогнозировании развития навигационной ситуации в течение некоторого интервала времени и пространства. Исследовано также влияние различных факторов, приводящих к потере владения ситуацией командой мостика на каждом из ее уровней.

Ключевые слова: владение ситуацией, ментальная модель ситуации, безопасность мореплавания, стесненные воды, посадка на мель.

Для цитирования:
Жмур А. А. Применение теории владения ситуацией при изучении отчетов о расследованиях случаев посадки судов на мель / А. А. Жмур, В. А. Логиновский // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2018. — Т. 10. — № 6. — С. 1200–1210. DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-6-1200-1210.

Введение (Introduction)

По данным Европейского агентства по безопасности на море (European Maritime Safety Agency — EMSA), аварийные случаи, связанные с посадкой судов на мель, составляют 16 % от суммарного количества инцидентов в мировом судоходстве, произошедших в течение 2011 – 2017 гг. Также было установлено, что 60 % аварийных случаев связаны с ошибочными действиями человека [1]. Катастрофический потенциал подобного рода аварий наглядно проявился в случаях аварий танкеров «Torrey Canyon» и «Exxon Valdez». Усилия исследователей сфер инженерной психологии и безопасности морского транспорта направлены на улучшение понимания фундаментальных факторов, оказывающих влияние на возникновение человеческой ошибки и, как следствие, аварий, существенным фактором которых может являться человеческая ошибка. Одним из наиболее перспективных подходов считается использование концепции владения ситуацией [2], которая кратко может быть интерпретирована как «осведомленность судоводителя о том, что происходит вокруг судна, а также понимание того, что означает текущая информация и способность адекватно прогнозировать развитие ситуации» в некотором интервале времени и пространства

В данной концепции существует большое количество подходов и моделей к определению источников, механизмов развития и функционирования «владения ситуацией» человеком-оператором. Однако все основные подходы к феномену *владения ситуацией*, имеющие место в данное время, едины в том, что это ключевой фактор эффективного и безопасного выполнения задач в системах «человек-машина» [3]–[5]. Появившаяся в авиационной отрасли концепция владения ситуацией к настоящему времени распространилась на самые различные отрасли, среди которых ядерная энергетика, медицина, военная техника и другие, в которых имеет место процесс управления сложными динамическими системами [3]. Несмотря на то, что данная теория подвергается острым дискуссиям относительно подходов и методов ее изучения и применения [6–8], она является ключевым и одним из наиболее обсуждаемых вопросов в современной инженерной психологии и эргономике (Human Factors and Ergonomics) [3]. Концепция владения ситуацией широко применяется для анализа аварийности [9], [10] и выработки эффективных подходов к обеспечению безопасности в оффшорном секторе [11]. Австралийские исследователи в 2002 г. применили концепцию к анализу причин аварий в судоходстве [12].

Манильскими поправками 2010 г. к «Международной конвенции о подготовке и дипломировании моряков и несении вахты 1978 года» были введены требования к вопросу о владении ситуацией в квалификационные таблицы подготовки командного состава судов [13]. Однако владение ситуацией в мореплавании является на текущий момент малоизученным вопросом как в России, так и за рубежом. Не вполне ясны механизмы достижения и поддержания определенного уровня владения ситуацией оператором (судоводителем), а также требует детального исследования роль таких факторов, как усталость, мыслительная нагрузка и невнимательность при несении вахты на мостике, которые оказывают влияние на возникновение ошибочных действий членов экипажей морских судов в процессе их работы в различных условиях плавания.

Целью данной статьи является исследование фактических данных о случаях посадки судов на мель, предметом исследования — влияние уровня владения ситуацией членов команды мо-

стика на возникновение ошибок, связанных с человеческим фактором. Объектами исследования являются 38 отчетов о расследовании аварийных ситуаций в водах Канады, США и Австралии за период 2007–2017 гг. Прежде всего исследование фокусируется на операциях, совершаемых членами команды мостика и лоцманами, и поэтому ограничивается анализом событий, происходящих на мостике перед аварийным случаем.

Методы и материалы (Methods and materials)

Данные об аварийных случаях содержатся в отчетах о результатах расследования того или иного навигационного происшествия (далее — отчеты). В ходе выполнения исследования был выполнен анализ 38 отчетов, находящихся в открытом доступе на специализированных интернет-ресурсах организаций, законодательно уполномоченных к выполнению расследований происшествий в территориальных водах соответствующих государств. Основные характеристики выборки представлены в табл. 1.

Таблица 1

Информация об отчетах о расследовании аварийных случаев

Страна	Источник отчетов о расследовании аварийных случаев	Количество отчетов	Даты аварийных случаев	Ссылка на источник	Форматы названия отчетов
Канада	Transportation Safety Board of Canada (TSB), Канадский совет по безопасности на транспорте	15	С 10.2012 по 10.2016	http://www.tsb.gc.ca/eng/rapports-reports/marine/index.asp	MxxCxxxx MxxPxxxx MxxHxxxx MxxIxxxx
США	National Transportation Safety Board (NTSB), Национальный комитет по безопасности перевозок	13	С 04.2006 по 03.2017	https://www.ntsb.gov/investigations/AccidentReports/Pages/marine.aspx	NTSB/MAB-xx/xx;
Австралия	Australian Transport Safety Bureau (ATSB), Управление транспортной безопасности Австралии	10	С 05.2007 по 10.2016	https://www.atsb.gov.au/publications/safety-investigation-reports/?mode=Marine	ATSB Marine Occurrence Investigation No. xxx; MO-20XX-XXX; MAIRxxx

Примечание. x — обозначение цифры в указанном формате (например, формат отчета M14C0219 — MxxCxxxx).

На первом этапе анализа отчеты были разделены по категориям согласно типу и дедвейту судов, потерпевших посадку на мель. На рис. 1 приведено количество судов каждого типа, вовлеченных в аварийные случаи, рассмотренные в исследовании.

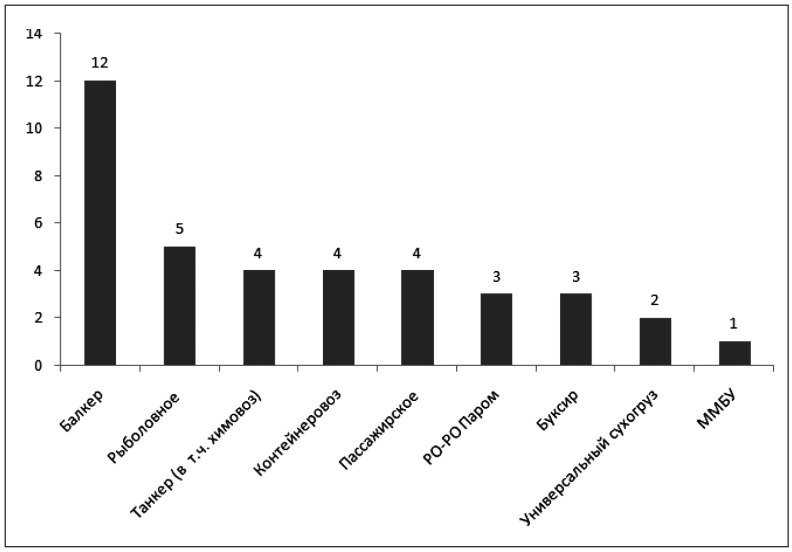


Рис. 1. Количество судов разных типов, вовлеченных в случаи посадки на мель (ММБУ — мобильная морская буровая установка)

На рис. 2 показано количество аварий в каждой категории судов в зависимости от их дедвейта.

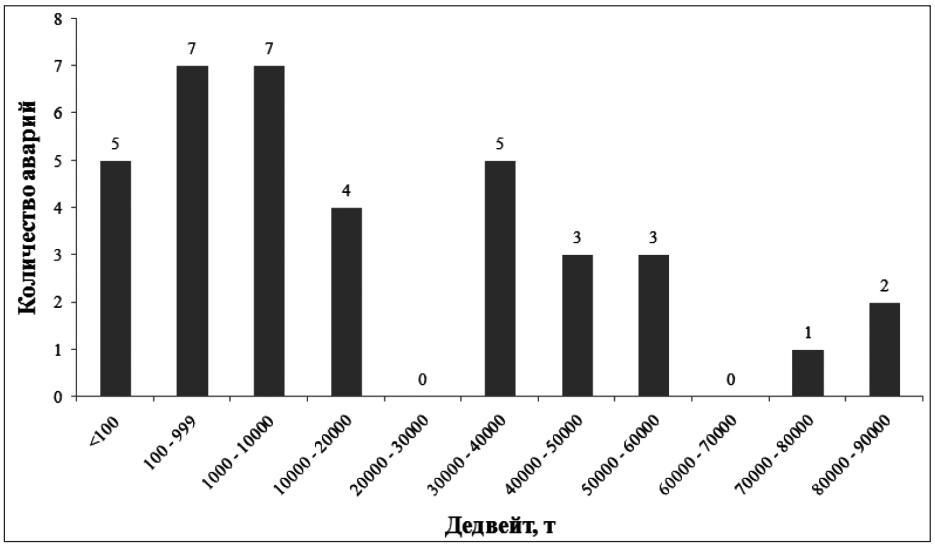


Рис. 2. Количество аварий в зависимости от дедвейта судов

На втором этапе были выделены конкретные причины происшествий по данным отчетов. Все отчеты из исследуемых содержали описание событий и действий членов экипажа судов, имеющих отношение к конкретному аварийному случаю, а также наиболее вероятные, по версии авторов расследований, причины и факторы, которые явились причиной и привели к соответствующим аварийным ситуациям. В дальнейшем все отчеты были распределены на две категории в зависимости от природы основной причины аварийных случаев: нарушения работы технических систем судна или ошибки человека. Учитывая, что случаи посадки на мель часто происходят на участках лоцманской проводки, дополнительно отчеты были исследованы на предмет наличия / отсутствия лоцмана на мостике в момент инцидента. В результате этого двустороннего анализа были получены данные, приведенные в табл. 2.

Таблица 2

Данные о причинах инцидентов с учетом нахождения или отсутствия лоцмана на борту

Условия инцидента	Основная причина инцидента		Общее количество инцидентов
	Техническая неисправность	Человеческая ошибка	
В присутствие лоцмана на мостике	3	10	13
Без лоцмана на мостике	6	19	25
Всего	9	29	38

Дополнительно аварии были разделены по категориям в зависимости от величины относительного материального ущерба, а также с учетом природы таких предполагаемых причин, как техническая неисправность навигационного оборудования и ошибка судоводителя (табл. 3).

Таблица 3

Последствия исследуемых инцидентов

Ущерб	Аварии по причине технической неисправности	Аварии по причине человеческой ошибки	Общее количество аварий
Незначительный	3	10	13
Серьезный	5	18	23
Потеря судна*	1	1	2

*Наличие фатальных исходов.

На третьем этапе отдельно были рассмотрены отчеты об авариях, основной причиной которых считается ошибка судоводителя. Отчеты этой категории были проанализированы с точки зрения концепции владения ситуацией. С помощью представленной в публикации [14] модели классификации сбоев во владении ситуацией оператора аварийные случаи были разделены по уровням (под термином «сбой» в данном случае понимается потеря владения ситуацией командой мостика). Произошедший сбой на этих уровнях послужил причиной посадки на мель. В ходе выполнения третьего этапа факторы, которые, по мнению авторов отчетов, внесли значительный вклад в опасное развитие «сценариев» посадок на мель, были соотнесены с тремя уровнями владения ситуацией согласно модели Эндсли [2].

Четвертый этап анализа был выполнен с помощью использования концептуальной модели Джонса и Эндсли [14], которая классифицирует и описывает источники сбоев во владении ситуацией на каждом из трех уровней. Следует отметить, что существенным ограничением данного метода является значительная доля субъективности как в определении причин аварий лицами, проводящими расследование, так и в оценке принадлежности этих причин к той или иной категории сбоев, относящихся к уровням владения ситуацией. Ризон (Reason) отмечает следующее: «даже лучшие из них (подобные отчеты о расследовании) являются высоко избирательной версией действительности, и являют собой результат в высшей степени субъективного процесса» [15, с. 58]. Несмотря на то, что точность результатов, опубликованных в отчетах, может не в полной мере соответствовать действительному положению дел, в исследовании была предпринята попытка отобразить те условия, которые могут оказать влияние на уровень владения ситуацией и приводить к ошибкам судоводителя, выполняющего обязанности по несению ходовой вахты на мостике.

Результаты (Results)

Человеческая ошибка была идентифицирована как основная причина посадки на мель в двадцати девяти случаях из тридцати восьми. На рис. 3 приведены результаты анализа отчетов о расследовании аварий, проведенного в соответствии с концептуальной моделью Эндсли и Джонса [14].

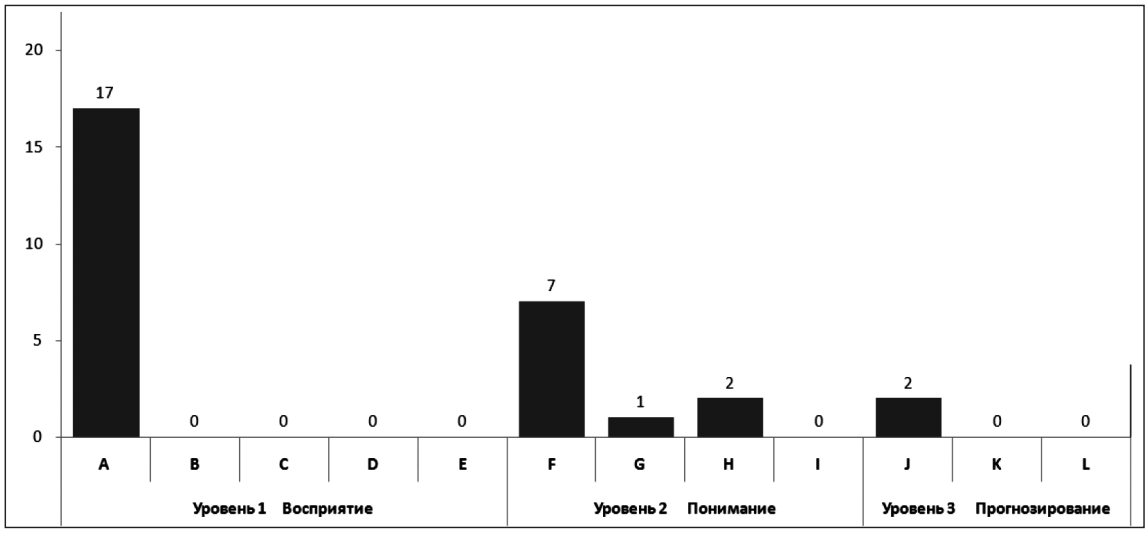


Рис. 3. Распределение сбоев во владении ситуацией в зависимости от уровня и категории

Условные обозначения:

A — отсутствие должного наблюдения и слежения за параметрами развития навигационной ситуации;
B — трудности с распознаванием данных о ситуации; *C* — данные о ситуации недоступны;
D — ошибочное восприятие данных о ситуации; *E* — выпадение данных из памяти оператора;
F — неполная ментальная модель навигационной ситуации (не все факторы учитываются);
G — неадекватная ментальная модель навигационной ситуации (неправильное понимание);
H — чрезмерная уверенность в неизменности исходных параметров; *I* — другое;
J — неполная ментальная модель навигационной ситуации (причина неверного прогноза);
K — чрезмерная уверенность в неизменности текущих тенденций; *L* — другое

Рассмотрим далее аварийные случаи согласно уровням и категориям ошибок владения ситуацией.

Ошибки уровня 1 — это восприятие (Perception) соответствующей навигационной информации, что означает отсутствие должного наблюдения и слежения за параметрами ситуации (*Failure to Monitor or Observe Data*).

На рис. 3 ошибки этого уровня представлены в категориях *A–E* (всего семнадцать случаев). Во всех семнадцати случаях посадки на мель, которые были вызваны предположительно сбоем на первом уровне владения ситуацией, причиной послужило отсутствие должного наблюдения за критически важными параметрами обстановки со стороны команды мостика. Семь случаев были связаны с тем, что наблюдение за местоположением судна не велось вообще. Обращают на себя внимание два показательных случая, в результате которых два балкера Panamax сели на небольшие отдельные подводные рифы, отмеченные на карте. Например, вахтенный помощник судна «Atlantic Eagle» при следовании в прибрежном районе не производил определение места судна в течение более получаса, в том числе после поворота на новый курс. Также он не учитывал дрейф судна, слепо следуя указанию капитана «держать заданный курс» (см. отчет ATSB No. 255).

Балкер «Amakusa Island» дедвейтом более 81000 т при выходе из порта Принс Руперт (Британская Колумбия) произвел касание подводной горы носовой частью, в результате чего в корпусе судна образовались пробоины длиной до 30 м и шириной до 1 м с последующим поступлением забортной воды в балластные танки. Капитан и лоцман при предварительной прокладке курса не заметили подводную гору с глубинами над ней, меньшими осадки судна (см. отчет TSBC M14P0150). Вероятно, в случае ведения должного наблюдения за местоположением судна этот факт был бы обнаружен, и аварии удалось бы избежать, заблаговременно обойдя данное препятствие.

Два рыболовных судна: «St. Dominick» и «Day Island», сели на мель вследствие того, что капитаны обоих судов заснули, находясь на вахте при неправильно настроенной системе контроля дееспособности вахтенного помощника (BNWAS) — см. отчеты NTSB/MAB-18/03 и NTSB/MAB-16/26.

Причиной четырех произошедших аварий является то, что команда мостика не заметила, что рулевой после получения и ответного подтверждения приказа о перекладке руля в сторону определенного борта перекладывал руль в противоположную сторону: «Рулевой дважды непреднамеренно переложил руль на правый борт во время запланированного изменения курса влево, что привело к развороту судна в направлении, противоположном необходимому» (см. отчет M14C0219, с. 28). Подобные обстоятельства в считанные минуты приводили к выходу судна за границу безопасных глубин и, в итоге, к посадке на грунт. Авторы расследований отмечают, что основной причиной неправильно исполнения команды на руль была усталость рулевого вследствие нарушения его режима труда (например, см. отчет M14C0219).

Шесть случаев посадки на мель произошли по причине неиспользования всех доступных средств для определения местоположения судна в сложных навигационных условиях. К примеру, при лоцманской проводке контейнеровоза «New Delhi Express» лоцманом и капитаном использовалась информация о местоположении судна, полученная от капитанов буксиров сопровождения, а не от источников навигационной информации, находящихся на мостике: РЛС и ЭКНИС.

Ошибки уровня 2 — понимание (Comprehension) воспринятой навигационной информации, характеризующей текущую обстановку. Среди 29 случаев аварий, причиной которых предположительно является человеческий фактор, в десяти случаях наиболее вероятными являются ошибки уровня 2. На рис. 3 ошибки данного уровня представлены в категориях *F–I*.

Неполная ментальная модель навигационной ситуации или ее отсутствие (Lack of / poor Mental Model) в семи случаях, которые были классифицированы как ошибки вахты на мостике в действиях на втором уровне владения ситуацией, члены команды мостика восприняли информацию об окружающей обстановке, но не смогли правильно интерпретировать и понять ее значение. Предполагается, что данные случаи произошли в результате применения «неполной ментальной модели ситуации» и связаны с непониманием состояния и правил использования технических си-

стем судна. Ментальная модель может быть описана как «совокупность психических механизмов, с помощью которых люди способны реконструировать в своем сознании элементы наблюдаемых объектов или систем, закономерности их функционирования и взаимодействия, а также прогнозировать их состояние в будущем» [2, с. 60]. Другими словами, ментальная модель представляет собой мысленную схему того или иного объекта или ситуации в сознании оператора и служит для «направления внимания на выполняемые действия и воспринимаемые сигналы окружающей среды, а также играет ключевую роль в интеграции и понимании воспринимаемых данных и прогнозировании будущего состояния окружающей среды. Таким образом, эти механизмы помогают лицу, принимающему решения, достичь необходимого качества владения ситуацией на каждом уровне в условиях ограниченных данных» [2, с. 58].

Приведем примеры низкого качества владения ситуацией на втором уровне. Танкер-химовоз сел на мель в результате неумышленного перевода управления судна со следящего режима авторулевого в режим удаленного управления (NFU) и последующего неуправляемого поворота в сторону глубин, меньших осадки судна. В отчете о расследовании данного происшествия отмечена недостаточная подготовка лиц, отвечающих за навигационную безопасность, в частности отмечалось следующее: «Команда мостика не была адекватно ознакомлена с характеристиками рулевого устройства судна и не знала, как восстановить управление судном после сигнала о выключении режима авторулевого» (см. отчет M14C0045, с. 19).

В других случаях использование неполной ментальной модели привело к неправильному учету проседания и управляемости судна на мелководье, а также к неадекватной оценке безопасной скорости судна, обеспечивающей необходимые маневровые характеристики (см. отчеты NTSB/MAB-14/12 и ATSB Marine Occurrence Investigation No. 252).

Использование неадекватной ментальной модели (Use of Incorrect Mental Model). В данном случае, который относится к этой категории ошибок владения ситуацией, ключевую роль сыграло применение командой мостика определенных действий, которые не соответствуют *хорошей морской практике*: «…возможной причиной посадки на мель была практика вахтенного помощника в прохождении рядом с затопленной частью разрушенного пирса, известного и нанесенного на карты как подводное препятствие, что, в конечном итоге, закончилось тем, что судно наскочило на препятствие» (см. отчет NTSB/MAB- 14/20, с. 8).

Чрезмерная уверенность в неизменности исходных параметров (over-reliance on default values). В двух случаях происшествий имело место использование командой мостика привычных данных о необходимых действиях в определенных ситуациях без принятия во внимание того, что некоторые исходные параметры данной ситуации отличны от тех, с которыми члены экипажа сталкивались ранее. Этому способствует отсутствие должной коммуникации между членами команды мостика, в результате чего, например, у лоцмана и капитана сформировались различные подходы к выполнению тех или иных важных для обеспечения навигационной безопасности операций. Так произошло, например, в случае посадки на мель судна «Claude A. Desgagnes» при входе в один из шлюзов Морского пути реки Св. Лаврентия. Одним из основных факторов, приведших к аварии, было признано следующее: «эффективные меры по снижению скорости судна не были предприняты вследствие того, что между капитаном и лоцманом не было ясной взаимной договоренности о том, какой маневр было бы лучше всего предпринять при входе в шлюз» (см. отчет M13C0071, с. 12).

Ошибки уровня 3 — прогноз (Projection) развития навигационной ситуации.

Среди сбоев во владении ситуацией уровня 3 к авариям приводили ошибки одной категории *— неполная ментальная модель или ее отсутствие (Lack of or Incomplete Mental Model).* Два случая из двадцати девяти были классифицированы как следствие ошибки на уровне 3 владения ситуацией, что подразумевает ошибку команды мостика в прогнозировании развития ситуации. Так, например, вследствие недооценки вахтенным помощником возможного опасного развития ситуации, и, как следствие, запоздалых действий по уходу от опасности, судно «CWB Marquis» было заблокировано дрейфующими льдами и впоследствии вынесено ледовым полем на мель (см. отчет M15C0028).

Обсуждение (Discussion)

Предположительно в одном случае из девяти, связанных с технической поломкой, у экипажа была возможность избежать посадки на мель, однако, из-за неэффективных действий после блэкаута, эта возможность не была реализована. В оставшихся восьми случаях, связанных с поломками рулевого механизма и двигателя, действия экипажа были признаны авторами расследований полными, с максимальным использованием всех доступных средств для предотвращения аварии. Полученные данные указывают на то, что многие случаи, связанные со сбоями во владении ситуацией вахтенными на мостике, происходили в условиях, когда члены команды мостика сталкивались с нештатными ситуациями, в которых они испытывали затруднения в быстром и точном реагировании на сложные быстроменяющиеся условия. Такие ситуации, очевидно, требовали быстрого переключения с деятельности по наблюдению за окружающей обстановкой на действия, связанные с принятием решений в условиях ограниченного времени и недостаточных данных. Поэтому важной задачей является разработка такой методики подготовки членов команды мостика, в результате применения которой время на переключение внимания, а также на принятие эффективного решения и на выполнение действий будет минимальным.

С точки зрения владения навигационной ситуацией для судоводителей является важным выработка навыка, привычки своеобразного регулярного прогнозирования развития возможных негативных «сценариев» типа: «*Что может пойти не так в текущей ситуации и какие действия следует предпринять для поддержания уровня навигационной безопасности в этих новых неблагоприятных обстоятельствах*». При должной тренировке данного навыка возможные «сценарии» будут анализироваться в сознании судоводителя автоматически (неосознанная компетентность), что позволит более эффективно использовать принцип хорошей морской практики: «считай себя ближе к опасности».

Результаты проведенного исследования показали необходимость более детальной разработки концепции ментальной модели судоводителя применительно к аварийной ситуации. В модели Эндсли под ментальной моделью, которую формирует и использует человек в своей деятельности, понимаются «механизмы, благодаря которым люди способны создавать описания целей и форм систем; объяснение состояний и способов функционирования этих систем, включая прогноз их развития во времени и пространстве» [2, с. 60]. Очевидно, что члены команды мостика, включая лоцмана в соответствующих ситуациях, полагали, что принимают правильное решение, основанное на их восприятии и понимании информации из внешнего мира. Тот факт, что их решения приводили в дальнейшем к авариям, демонстрирует, что их действия были ошибочны, а следовательно, и их ментальная модель ситуации была ошибочной, неадекватной ситуации, в которой они, операторы судна, в тот момент находились.

Ранее изложенное, а также рассмотрение обстоятельств аварии судна «Atlantic Eagle» (см. отчет AMSA No. 255), которая произошла во многом из-за того, что вахтенный помощник капитана слепо следовал указанию капитана «держать курс заданный курс», не предпринимая мер по должному определению места судна, позволяют сделать некоторые предварительные предположения о том, что, вероятно, что в определенный момент в сознании члена команды мостика может происходить смена адекватной ментальной модели, способствующей поддержанию навигационной безопасности (в рассматриваемом случае можно назвать ее «контроль места судна и элементов дрейфа»), на другую, «неправильную», модель — «следовать заданным курсом по указанию капитана, *не учитывая такой важный навигационный параметр, как ветровой дрейф».* Именно на это обстоятельство указывает Эндсли: «Текущие цели, поставленные перед оператором, определяют выбор ментальной модели и ее фокусирование (или фрейминг) на решение определенных задач» [2, с. 40]. Следует отметить два аспекта этого «переключения», во-первых, оно происходит *неосознанно* и поэтому практически не поддается контролю со стороны оператора; во-вторых, вероятно, имеет место искажение, связанное с влиянием на решения человека мнения другого, намного более авторитетного лица, в данном случае капитана. Имеются основания полагать, что ход мыслей вахтенного помощника (возможно неосознанный) мог быть следующим: «Капитан

дал указание держать определенный курс, а значит, он (капитан) знает, что никаких опасностей на этом курсе нет». Таким образом, бдительность вахтенного помощника снизилась настолько, что за последующие полчаса он не произвел ни одного определения местоположения даже после поворота на указанный курс, что и привело к последующему столкновению с отдельно стоящим подводным рифом небольшого размера.

Другим распространенным «сценарием» аварийной посадки на мель является ситуация непреднамеренной перекладки руля в сторону, противоположную от заданной, рулевому. Три из четырех случаев такого действия рулевого объяснялись усталостью, один — тем, что рулевой «витал в облаках», т. е. в этой ситуации также наблюдалось переключение ментальной модели с «профессионального наблюдения за ситуацией» на «внутренние переживания из-за усталости или иных факторов». Одним из перспективных научных направлений, в рамках которого разрабатывается подобная тематика, является стремительно развивающееся направление *нейроэргономика* [3], [16], [17]. Данное направление является междисциплинарным направлением инженерной психологии, занимающимся изучением производительности человека в профессиональной и других видах деятельности на основе объективных данных о его нейрофизиологических механизмах поведения [18]. С помощью этих данных нейроэргономика подходит к пониманию влияния таких базовых процессов для владения ситуацией, как рабочая память, усталость, переключение внимания с окружающей ситуации на внутренние переживания [19], [20].

Заключение (Conclusion)

В данной работе для исследования факторов, влияющих на возникновение ошибки человека, был проведен анализ данных, полученных из отчетов о расследовании аварийных ситуаций посадки судов на мель с использованием концептуальной модели владения ситуацией Эндсли (Endsley). Данные, полученные в ходе настоящего исследования, подтверждают результаты предшествующих исследований о том, что около 80 % аварийных случаев в мореплавании происходят, в значительной мере, по причине человеческой ошибки. В 78 % аварийных случаев, рассмотренных в данном исследовании, главенствующей причиной, вероятнее всего, являлась ошибка человека-оператора.

Результаты исследования показывают, что ошибки, связанные с владением ситуацией, были определены во всех 29 случаях посадки на мель, связанных с человеческой ошибкой. Анализ, проведенный в настоящем исследовании, выявил пять источников сбоев во владении ситуацией, среди которых наиболее частой причиной является, вероятно, *отсутствие должного наблюдения и слежения за параметрами ситуации.* Эти результаты, соответствующие данным подобных исследований в авиации [14], морском транспорте [12] и в оффшорной индустрии [9], [10], также выявили, что наиболее часто потери владения ситуацией относятся к случаям, в которых присутствует вся необходимая информация для полного понимания текущей ситуации, однако эта информация не воспринимается оператором должным образом.

Полученные в результате исследования данные подтверждают выводы предшествующих исследований о том, что сбой во владении ситуацией оператора является существенной причиной, способствующей возникновению ошибки человека-оператора. Все 29 аварий, возникших по причине человеческой ошибки, включают в себя потерю владения ситуацией на определенном уровне членами команды мостика.

В результате исследования было установлено, что в 60 % аварийных случаев присутствуют ошибки на первом уровне владения ситуацией, т. е. на уровне восприятия навигационной информации по причине невнимательности судоводителя или его усталости.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Annual Overview of Marine Casualties and Incidents 2017 [Электронный ресурс]. — Режим доступа: http://www.emsa.europa.eu/news-a-press-centre/external-news/item/3156-annual-overview-of-marine-casualties-and-incidents-2017.html (дата обращения: 25.09.2018).

2. *Endsley M. R.* Toward a Theory of Situation Awareness in Dynamic Systems / M. R. Endsley // Human Factors: The Journal of the Human Factors and Ergonomics Society. — 1995. — Vol. 37. — Is. 1. — Pp. 32–64. DOI:10.1518/001872095779049543.

3. *Stanton N. A.* State-of-science: situation awareness in individuals, teams and systems / N. A. Stanton, P. M. Salmon, G. H. Walker, E. Salas, P. A. Hancock // Ergonomics. — 2017. — Vol. 60. — Is. 4. — Pp. 449–466. DOI: 10.1080/00140139.2017.1278796.

4. *Endsley M. R.* Final Reflections: Situation Awareness Models and Measures / M.R. Endsley // Journal of Cognitive Engineering and Decision Making. — 2015. — Vol. 9. — Is. 1. — Pp. 101–111. DOI: 10.1177/1555343415573911.

5. *Lundberg J.* Situation Awareness Systems, States and Processes: A holistic framework / J. Lundberg // Theoretical Issues in Ergonomics Science. — 2015. — Vol. 16. — Is. 5. — Pp. 447–473. DOI: 10.1080/1463922X.2015.1008601.

6. *Wickens C. D.* Situation Awareness: Its Applications Value and Its Fuzzy Dichotomies / C. D. Wickens // Journal of Cognitive Engineering and Decision Making. — 2015. — Vol. 9. — Is. 1. — Pp. 90–94. DOI: 10.1177/1555343414564571.

7. *Dekker S. W. A.* Crew Situation Awareness in High-Tech Settings: Tactics for Research Into an Ill-Defined Phenomenon / S. W. A. Dekker // Transportation Human Factors. — 2000. — Vol. 2. — Is. 1. — Pp. 49–62. DOI: 10.1207/STHF0201_7.

8. *Endsley M. R.* Situation Awareness Misconceptions and Misunderstandings / M. R. Endsley // Journal of Cognitive Engineering and Decision Making. — 2015. — Vol. 9. — Is. 1. — Pp. 4–32. DOI: 10.1177/1555343415572631.

9. *Sneddon A.* Situation awareness and safety in offshore drill crews / A. Sneddon, K. Meams, R. Flin // Cognition, Technology & Work. — 2006. — Vol. 8. — Is. 4. — Pp. 255–267. DOI: 10.1007/s10111-006-0040-1.

10. *Sandhåland H.* Situation awareness in bridge operations – A study of collisions between attendant vessels and offshore facilities in the North Sea / H. Sandhåland, H. Oltedal, J. Eid // Safety Science. — 2015. — Vol. 79. — Pp. 277–285. DOI: 10.1016/j.ssci.2015.06.021.

11. *Roberts R.* Staying in the Zone: Offshore Drillers' Situation Awareness / R. Roberts, R. Flin, J. Cleland // Human Factors. — 2015. — Vol. 57. — Is. 4. — Pp. 573–590. DOI: 10.1177/0018720814562643.

12. *Grech M. R.* Human Error in Maritime Operations: Analyses of Accident Reports Using the Leximancer Tool / M. R. Gretch, T. Hornberry, A. Smith // Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting. — 2002. — Vol. 46. — Is. 19. — Pp. 1718–1721. DOI: 10.1177/154193120204601906.

13. Международная конвенция о подготовке и дипломировании моряков и несении вахты 1978 года (ПДНВ-78) с поправками: (консолидированный текст). — СПб.: ЦНИИМФ, 2016. — 824 с.

14. *Jones D. G.* Sources of situation awareness errors in aviation / D. G. Jones, M. R. Endsley // Aviation, space, and environmental medicine. — 1996. — Vol. 67. — Is. 6. — Pp. 507–512.

15. *Reason J.* The human contribution: unsafe acts, accidents and heroic recoveries / J. Reason. — London: CRC Press, 2008. — 310 p.

16. *Kramer A. F.* Neuroergonomics: Applications of Neuroscience to Human Factors / A. F. Kramer, R. Parasuraman // Handbook of Psychophysiology; под ред. J. T. Cacioppo, L.G. Tassinary, G. Berntson. — 3d edition. — Cambridge: Cambridge University Press, 2007. — Pp. 704–722. DOI: 10.1017/CBO9780511546396.030.

17. Neuroergonomics: A Cognitive Neuroscience Approach to Human Factors and Ergonomics / под ред. A. Johnson, R. W. Proctor. — London: Palgrave Macmillan UK, 2013. — 271 p. DOI: 10.1057/9781137316523.

18. *Parasuraman R.* Neuroergonomics: Brain, Cognition, and Performance at Work / R. Parasuraman // Current Directions in Psychological Science. — 2011. — Vol. 20. — Is. 3. — Pp. 181–186. DOI: 10.1177/0963721411409176.

19. *Menon V.* Large-Scale Functional Brain Organization / V. Menon // Brain Mapping: An Encyclopedic Reference; edited by Arthur W. Toga. — Academic Press: Elsevier, 2015. — Vol. 2. — Pp. 449–459. DOI: 10.1016/B978-0-12-397025-1.00024-5.

20. *Sood A.* On mind wandering, attention, brain networks, and meditation / A. Sood, D. T. Jones // Explore (NY). — 2013. — Vol. 9. — Is. 3. — Pp. 136–141. DOI: 10.1016/j.explore.2013.02.005.

REFERENCES

1. Annual Overview of Marine Casualties and Incidents 2017. Web. 25 Sept. 2018 <http://www.emsa.europa.eu/news-a-press-centre/external-news/item/3156-annual-overview-of-marine-casualties-and-incidents-2017.html>.

2. Endsley, Mica R. "Toward a Theory of Situation Awareness in Dynamic Systems." *Human Factors: The Journal of the Human Factors and Ergonomics Society* 37.1 (1995): 32–64. DOI: 10.1518/001872095779049543.

3. Stanton, N. A., P. M. Salmon, G. H. Walker, E. Salas, and P. A. Hancock. "State-of-Science: Situation Awareness in Individuals, Teams and Systems." *Ergonomics* 60.4 (2017): 449–466. DOI: 10.1080/00140139.2017.1278796.

4. Endsley, Mica R. "Final Reflections: Situation Awareness Models and Measures." *Journal of Cognitive Engineering and Decision Making* 9.1 (2015): 101–11. DOI: 10.1177/1555343415573911.

5. Lundberg, Jonas. "Situation Awareness Systems, States and Processes: A holistic framework." *Theoretical Issues in Ergonomics Science* 16.5 (2015): 447–473. DOI: 10.1080/1463922X.2015.1008601.

6. Wickens, Christopher D. "Situation Awareness: Its Applications Value and Its Fuzzy Dichotomies." *Journal of Cognitive Engineering and Decision Making* 9.1 (2015): 90–94. DOI: 10.1177/1555343414564571.

7. Dekker, Sidney W. A. "Crew Situation Awareness in High-Tech Settings: Tactics for Research Into an Ill-Defined Phenomenon." *Transportation Human Factors* 2.1 (2000): 49–62. DOI: 10.1207/STHF0201_7.

8. Endsley, Mica R. "Situation Awareness Misconceptions and Misunderstandings." *Journal of Cognitive Engineering and Decision Making* 9.1 (2015): 4–32. DOI: 10.1177/1555343415572631.

9. Sneddon, Anne, K. Meams, and R. Flin. "Situation Awareness and Safety in Offshore Drill Crews." *Cognition, Technology & Work* 8.4 (2006): 255–267. DOI: 10.1007/s10111-006-0040-1.

10. Sandhåland, Hilde, H. Oltedal, and J. Eid. "Situation Awareness in Bridge Operations – A Study of Collisions between Attendant Vessels and Offshore Facilities in the North Sea." *Safety Science* 79 (2015): 277–285. DOI: 10.1016/j.ssci.2015.06.021.

11. Roberts, Ruby, R. Flin, and J. Cleland. "Staying in the Zone: Offshore Drillers' Situation Awareness." *Human Factors* 57.4 (2015): 573–590. DOI: 10.1177/0018720814562643.

12. Grech, Michelle R., T. Hornberry, and A. Smith. "Human Error in Maritime Operations: Analyses of Accident Reports Using the Leximancer Tool." *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting* 46.19 (2002): 1718–1721. DOI: 10.1177/154193120204601906.

13. International Convention on Standards of Training, Certification and Watchkeepeng for Seafarers. — London: IMO, 2011. — 420 p.

14. Jones, Debra G., and Mica R. Endsley. "Sources of Situation Awareness Errors in Aviation." *Aviation, Space, and Environmental Medicine* 67.6 (1996): 507–512.

15. Reason, J. *The human contribution: unsafe acts, accidents and heroic recoveries*. London: CRC Press, 2008.

16. Kramer, Arthur F., and Raja Parasuraman. "Neuroergonomics: Applications of Neuroscience to Human Factors." *Handbook of Psychophysiology.* Edited by John T. Cacioppo, et al. 3d ed. Cambridge University Press, 2007. 704–22. DOI: 10.1017/CBO9780511546396.030.

17. Johnson, Addie, and Robert W. Proctor, editors. *Neuroergonomics: A Cognitive Neuroscience Approach to Human Factors and Ergonomics*. London: Palgrave Macmillan UK, 2013. DOI: 10.1057/9781137316523.

18. Parasuraman, Raja. "Neuroergonomics: Brain, Cognition, and Performance at Work." *Current Directions in Psychological Science* 20.3 (2011): 181–186. DOI: 10.1177/0963721411409176.

19. Menon, V. "Large-Scale Functional Brain Organization." *Brain Mapping: An Encyclopedic Reference*. Edited by Arthur W. Toga. Vol. 2. Academic Press: Elsevier, 2015. 449–459. DOI: 10.1016/B978-0-12-397025-1.00024-5.

20. Sood, Amit, and David T. Jones. "On Mind Wandering, Attention, Brain Networks, and Meditation." *Explore (New York, N.Y.)* 9.3 (2013): 136–141. DOI: 10.1016/j.explore.2013.02.005.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Жмур Андрей Александрович —
3-й помощник капитана
Laskaridis Shipping Company Ltd.
145 62, Greece, Athens, Xenias Street, & Ch.Trikoupi5
e-mail: *por83zh@mail.ru*

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

INFORMATION ABOUT AUTHORS

Zhmur, Andrew A. —
3rd mate,
Laskaridis Shipping Company Ltd.
5, Xenias Street, & Ch.Trikoupi, Athens, 145 62, Greece
e-mail: *por83zh@mail.ru*

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: *vl.loginovsky@rambler.ru*, *kaf_nav@gumrf.ru*

Статья поступила в редакцию 7 декабря 2018 г.
Received: December 7, 2018.

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

ВОДНЫЕ ПУТИ СООБЩЕНИЯ И ГИДРОГРАФИЯ

DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-6-1211-1224

ICE CONDITION FEATURES OF HYDROGRAPHIC VESSELS FOR WORK IN KARA SEA

R. V. Ivanov[1], D. A. Polubelov[1], A. A. Soboleva[2]

[1] — Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping, St. Petersburg, Russian Federation
[2] — LLC Tunnel technology

The features of the formation and evolution of the ice conditions of the Kara Sea are considered to determine the most favorable period of operation of hydrographic vessels. It is noted that the main type of nautical charts in the Kara Sea are travel maps of 1: 150 000 scale. The focus is on the navigational characteristics of ice, which have a significant impact on the polar shipping. The characteristic of the time component of the processes of ice formation in the Kara Sea from 1996 to 2010 is given. The average repeatability and size of the fast ice glades of the Kara Sea for the period from October to June in the period from 1980-2008 are analyzed. An analysis of the timing of the purification of the water area at the polar stations of the southwestern part of the Kara Sea is provided. The conditions of ice navigation in spring and autumn are given. The nature of navigation in the Arctic waters is considered during the formation of three types of ice conditions: light, medium and heavy. An analytical review and synthesis of data on the percentage of light, medium and heavy ice conditions over 50 years, in the period from 1967 - 2017, is given for July, August and September. Examples of calculating ice figures for vessels of class Arc5 for different ice conditions are considered. An assessment is made of the possibility of operation of ice class vessels in conditions of year-round navigation. A comparative analysis of the compliance of the requirements of the Russian system for assessing the possibility of navigation of ships of various classes in the ice with the Canadian one was made. The safe navigation speed of Arc5 class hydrographic vessels is estimated from June to January and from February to May. The necessity of further hydrographic exploration is substantiated.

Keywords: ice cover, landfast, ice conditions, ice criterion, ice multiplier, ice class, hydrographic knowledge, ice figure, arctic shelf, safe speed.

For citation:
Ivanov, Roman V., Denis A. Polubelov, and Anastasiya A. Soboleva. "Ice condition features of hydrographic vessels for work in Kara sea." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 10.6 (2018): 1211–1224. DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-6-1211-1224.

УДК 551.506

ХАРАКТЕРИСТИКА ЛЕДОВЫХ УСЛОВИЙ РАБОТЫ ГИДРОГРАФИЧЕСКИХ СУДОВ В КАРСКОМ МОРЕ

Р. В. Иванов[1], Д. А. Полубелов[1], А. А. Соболева[2]

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

Рассмотрены особенности формирования и развития ледовых условий Карского моря на предмет определения наиболее благоприятного периода работы гидрографических судов. Отмечается, что основным видом навигационных морских карт в Карском море являются путевые карты масштабов 1:150 000. Основное внимание уделено навигационным характеристикам льда, оказывающим существенное влияние на полярное судоходство. Дана характеристика временной составляющей процессов ледообразования Карского моря в период 1996–2010 гг. Проанализирована средняя повторяемость и размеры заприпайных полыней Карского моря за период с октября по июнь в период 1980–2008 гг. Выполнен анализ сроков очищения акватории на полярных станциях юго-западной части Карского моря. Приведены условия ледового плавания в весенне-осенний период. Характер плавания в арктических водах рассматривается при фор-

мировании трех типов ледовых условий: легких, средних и тяжелых. Приводится аналитический обзор и обобщение данных о процентном соотношении легких, средних и тяжелых ледовых условий за 50 лет, в период 1967–2017 гг., в июле, августе и сентябре. Рассмотрены примеры расчета ледовой цифры для судов класса Arc5 для разных ледовых условий. Дана оценка возможности работы судов ледового класса в условиях круглогодичной навигации. Произведен сравнительный анализ соответствия требований российской системы оценки возможности плавания судов различных классов во льдах и канадской. Дана оценка безопасной скорости плавания гидрографических судов класса Arc5 в период с июня по январь и с февраля по май. Освещена необходимость выполнения дальнейших гидрографических исследований.

Ключевые слова: ледяной покров, припай, ледовые условия, ледовый критерий, ледовый множитель, ледовый класс, гидрографическая изученность, ледовая цифра, Арктический шельф, безопасная скорость.

Для цитирования:
Иванов Р. В. Характеристика ледовых условий работы гидрографических судов в Карском море / Р. В. Иванов, Д. А. Полубелов, А. А. Соболева // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2018. — Т. 10. — № 6. — С. 1211–1224. DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-6-1211-1224.

Введение (Introduction)

В связи с проблемами неполной геологической изученности большинства месторождений Карского моря, а также сложностями добычи и транспортировки значительно затрудняется освоение углеводородных месторождений шельфа. Между тем для развития транспортной системы с позиции экономической эффективности необходим масштабный рост грузопотоков. Обеспечить его, на наш взгляд, могут только перевозки арктических углеводородных ресурсов. В перспективе ожидаемое увеличение грузопотоков определяется достаточно быстро растущим спросом на энергоресурсы и масштабным характером этого спроса. В глобальном аспекте это связано с существующим неравенством уровня жизни и, соответственно, потребления ресурсов. Так, страны Организации экономического сотрудничества и развития (ОЭСР), население которых составляет около 1,2 млрд чел. (15 % населения Земли), потребляют 5,5 млрд т первичных энергоносителей (более 45 %). В дальнейшем этот разрыв будет сокращаться, что послужит «локомотивом» увеличения спроса на рынках нефти и газа. Кроме того, наличие нового морского порта и завода по сжижению газа в рамках проекта «Ямал СПГ» предусматривает проведение как навигационно-гидрографического, так и гидрометеорологического обеспечения безопасности мореплавания.

Сложность ледовых условий и их влияние на различные виды морской деятельности в основном связана с колебаниями площадей ледяных массивов, которые подвержены не только межгодовой, но и климатической изменчивости. Анализу площадей ледяных массивов Карского моря в летний период для холодного (1954–1985 гг.) и теплого (1986–2017 гг.) климатических периодов в Арктике посвящена работа В. П. Карклина [1]. Анализ повторяемости типов развития ледяных массивов отдельно в холодный и теплый климатические периоды показал, что в каждом из них наблюдаются как тяжелый, так и легкий типы развития массивов. В течение указанных периодов чаще всего наблюдаются средние площади ледяных массивов, повторяемость которых близка к 50 %. На основе использования спутниковых данных И. Д. Карелиным совместно с В. П. Карклиным были получены площадные детальные съемки ледяного покрова с регулярностью 7–10 сут [2]. Эти данные позволили расширить имеющиеся представления о формировании припая и заприпайных полыней. Вместе с тем создание электронных ледовых карт и их анализ с помощью ГИС-технологий позволили оценить количество льдов различного возраста в период осенне-зимнего формирования ледяного покрова.

На основе опыта составления оперативных краткосрочных ледовых прогнозов, описанных в работе С. В. Клячкина [3], известно, что исходными данными для составления ледового прогноза служат электронные ледовые карты в формате ГИС ArcMap, которые составляются на основе спутниковых снимков и матрицы среднесезонных полей температуры и солености воды на стандартных горизонтах [4]. В зимний период электронные ледовые карты содержат инфор-

мацию о концентрации (общей и частной) и возрастном составе ледяного покрова, в летний — информацию только об общей концентрации. Анализ обобщенных результатов оценок достоверности прогнозов общей и частной концентрации льда по каждому региону (в течение всего периода наблюдений) позволил сделать ряд важных выводов:

– ввиду высокой оправдываемости (порядка 90 %) модель достаточно адекватно воспроизводит природный процесс;

– в среднем в течение 2–5 сут состояние ледяного покрова на 80–90 % остается неизменным, что свидетельствует о консервативности ледяного покрова как среды;

– молодые льды — наименее инерционная составляющая ледяного покрова, прогноз частной концентрации молодых льдов весьма сложен;

– эффективность прогнозов общей концентрации льда оказалась наибольшей (почти 4 %) несмотря на то, что оправдываемость примерно соответствует общему фону (около 92 %).

В гидрографическом отношении наименее изучена северная часть Карского моря и его юго-западный район, включая Новоземельский трог с глубинами до 400 м. Следует отметить, что в связи с увеличением осадки современных судов, которые планируется использовать на трассах Северного морского пути, его гидрографическая изученность уже не удовлетворяет современным требованиям, что является одной из основных причин проведения исследований в данном направлении на акватории упомянутого моря [5]. Таким образом, изменения погоды, ледовой обстановки и температуры в полярных водах весьма неожиданны, часто непредсказуемы, а решения должны приниматься в отношении рейсов, которые длятся в течение недель и месяцев, на основе пока еще ненадежных прогнозов. Ситуацию осложняет тот факт, что в полярных водах нет или мало портов-убежищ, ограничена доступность спасательных служб, что не позволяет уменьшить последствия возможной ошибки. При этом, по мнению А. Ю. Шаронова «Прохождение трассы и работа судов в водах Российской Арктики должны быть безопасными как для них, так и для экологии Арктики. Эти два аспекта ледовой навигации могут быть обеспечены хорошим знанием ледовых условий на трассе и способностью судна преодолевать льды без аварий» [6, с. 172]. Для выполнения гидрографических работ необходимо иметь сведения о ледовых условиях не только на трассе перехода в район работ, но и на акватории самого района. Различие географического положения арктических морей обуславливает пространственную и временную неоднородность распределения льдов и метеорологических характеристик на их акваториях.

Целью настоящей работы является обоснование возможных условий безаварийного плавания, а также вычисление безопасной скорости судов класса Arc5 с точки зрения выполнения комплексных гидрографических изысканий в Карском море.

Методы и материалы (Methods and Materials)

Образование льда начинается в юго-западной части Карского моря в октябре – ноябре [7]. Средние сроки первого появления льда и наступления устойчивого ледообразования на полярных станциях юго-западной части Карского моря указаны в табл. 1 и 2 соответственно. Все характеристики временной составляющей процессов ледообразования Карского моря были получены на основе обобщения и анализа данных Единой государственной системы информации об обстановке в Мировом океане (ЕСИМО) [8] за 14 лет в период 1996–2010 гг.

Таблица 1

Сроки первого появления льда на полярных станциях юго-западной части Карского моря

Сроки появления льда	Полярные станции					
	Болванский нос	Амдерма	Марре-Сале	Остров Белый	Остров Вилькицкого	Остров Диксон
Средний срок	16.12	10.11	28.10	23.10	16.10	10.10

Таблица 2

Сроки наступления устойчивого ледообразования на полярных станциях юго-западной части Карского моря

Сроки наступления льдообразования	Полярные станции					
	Болванский нос	Амдерма	Марре-Сале	о. Белый	о. Вильькицкого	о. Диксон
Средний срок	18.12	19.11	31.10	26.10	15.10	09.10

Неподвижный лед зимой бывает только у берегов в виде припая. За припаем обычно идут плавучие льды, чаще всего в виде обширных ледяных полей. За зиму лед достигает толщины 0,5 – 1,5 м. Плавучий лед бывает различных размеров и форм от мелких обломков до обширных ледяных полей. Возрастной состав льда и характеристики дрейфующего льда в осенне-зимний период представлены в табл. 3.

Таблица 3

Возрастной состав льда в осенне-зимний период, %, и характеристики дрейфующего льда

Возраст льда	Месяцы			Апрель-май			
	X	II	V	Длина ледовых полей, м	Толщина, м	Торосистось	Средняя высота торосов, м
Начальный	60	0	0	–	–	–	–
Молодой лед	40	12	15	–	–	–	–
Однолетний тонкий	0	35	3	–	–	–	–
Однолетний средний	0	53	20	–	–	–	–
Однолетний толстый	0	0	62	3000–6000	1,4–1,6	2–3	1,3–1,5
Двухлетний, многолетний	0	0	0	–	–	–	–

Когда молодой лед вдоль побережья материка и островов достигает толщины 10–30 см, образуется припай. При наибольшем развитии припая его мористая граница проходит в пределах изобат 10–20 м. В Карском море припай может образовываться в период с конца сентября на севере моря до конца января вблизи Амдерминского побережья и о. Вайгач. Сроки установления устойчивого припая на полярных станциях юго-западной части Карского моря приведены в табл. 4.

Таблица 4

Сроки становления устойчивого припая на полярных станциях юго-западной части Карского моря

Станции	Болванский нос	Амдерма	Марре Сале	о. Белый	о. Вилькицкого	о. Диксон
Средний срок	01.01	10.12	14.11	17.11	28.10	16.10

Вероятность сроков образования устойчивого припая, по данным спутниковых наблюдений, представлена в табл. 5. Сроки получены по данным искусственного спутника Земли (ИСЗ) в период 1980–2005 гг. [9].

Таблица 5

Вероятность сроков образования устойчивого припая, %, по данным спутниковых наблюдений

Районы	Месяцы												
	IX	X			XI			XII			I		
	Декады												
	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
Северная Земля	33	17	12	28	11	–	–	–	–	–	–	–	–
Подходы к проливу Вилькицкого	–	–	24	44	22	10	–	–	–	–	–	–	–
Пясинский залив — о. Норденшельда	–	9	26	41	14	5	4	–	–	–	–	–	–
Обь-Енисейский	–	–	8	53	31	4	4	–	–	–	–	–	–
Побережье Ямала	–	–	4	16	28	29	23	–	–	–	–	–	–
Амдерминское побережье	–	–	–	–	–	4	26	10	8	20	16	10	6

Чем ближе к Карским Воротам, тем больше растянут период образования припая. Так, образование припая вдоль побережья Ямала почти равновероятно в любой из декад ноября. На ноябрь приходятся 80 % случаев становления устойчивого припая. Самый большой разброс сроков образования припая наблюдается вблизи Амдерминского побережья и о. Вайгач. Припай образуется в период от середины ноября до конца января.

В течение зимнего периода за припаем образуются заприпайные полыньи — пространства с чистой водой или молодым льдом толщиной до 30 см (рис. 1), формирование которых зависит от направления и устойчивости ветровых потоков (табл. 6).

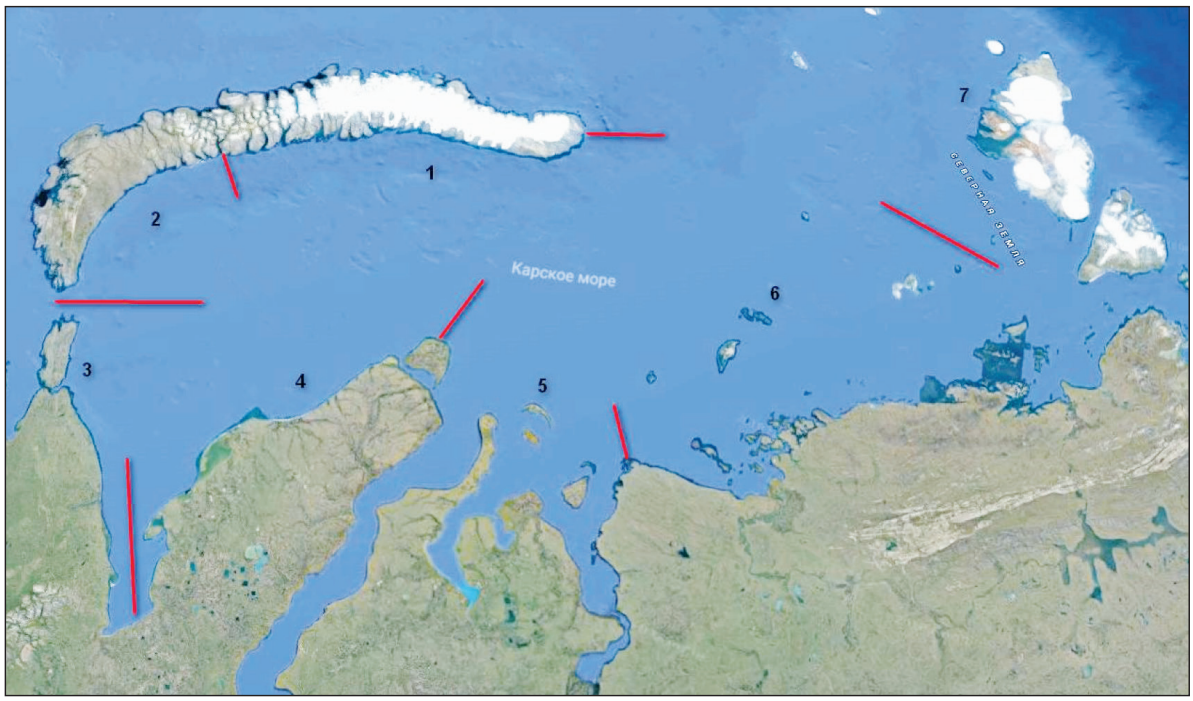


Рис. 1. Районы образования заприпайных полыней в Карском море:
1 — Северная Новоземельская; *2* — Южная Новоземельская; *3* — Амдерминская; *4* — Ямальская; *5* — Обь-Енисейская; *6* — Центральная Карская; *7* — Западная Североземельская

Таблица 6

Средняя повторяемость (*P*, %) и размеры заприпайных полыней Карского моря за период с октября по июнь по данным за 1980–2008 гг.

Название полыней	*P*, %	Характеристики					
		Длина, км		Ширина, км		Площадь, тыс. км^2	
		средняя	диапазон	средняя	диапазон	средняя	диапазон
Северная Новоземельская	59	341	50–630	28	2–110	10,0	0,5–66,0
Южная Новоземельская	58	271	60–350	42	2–160	10,4	0,5–45,0
Амдерминская	73	287	40–470	32	2–127	10,5	0,4–58,0
Ямальская	76	420	80–670	28	2–137	12,3	0,6–70,0
Обь-Енисейская	88	281	50–560	44	2–190	12,9	0,4–65,0
Ценральная Карская	80	479	50–920	36	2–138	20,9	1,0–14,0
Западная Североземельская	66	259	50–620	29	2–170	8,0	0,4–56,0

Центральная Карская и Североземельская полыньи находятся в северо-восточном районе Карского моря. Если бы все полыньи Карского моря существовали одновременно, то их площадь в среднем составила бы около 9 % от площади Карского моря [10].

Статистические характеристики ледовых условий в весенне-летний период. В юго-западной части Карского моря таяние ледяного покрова начинается в среднем в конце мая. В июне вытаивают молодые и однолетние тонкие льды в полыньях и в разводьях и частично однолетние средние льды. В процессе таяния ледяного покрова происходит взлом, постепенное разрушение припая и распадение его на обширные дрейфующие поля. Раньше всего припай начинает разрушаться в Амдерминском районе. В течение июня в 80 % случаев припай успевает окончательно разрушиться. Вдоль Ямальского побережья и в Обь-Енисейском районе припай обычно взламывается в середине июля.

Средние сроки окончательного разрушения припая на полярных станциях юго-западной части Карского моря:

Болванский нос 11.07
Амдерма 21.06
Марре Сале 01.07
о. Белый 14.07
о. Вилькицкого 17.07
о. Диксон 15.07

К концу июля половина юго-западной части моря под влиянием тепловых и динамических процессов очищается ото льда (табл. 7). В конце августа – начале сентября в 80 % случаев этот район полностью освобождается ото льда [11].

Средние сроки очищения акватории на полярных станциях юго-западной части Карского моря:

Болванский нос 23.07
Амдерма 25.07
Марре Сале 02.08
о. Белый 23.07
о. Вилькицкого 26.07
о. Диксон 19.07

Таблица 7

Площадь юго-западной части Карского моря, освобождающаяся ото льда в период таяния ледяного покрова, %

Месяцы											
Июнь			Июль			Август			Сентябрь		
Декады											
1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
8	11	12	22	38	48	80	91	94	100	100	100

Результаты (Results)

Характеристика работы гидрографических судов в весенне-летний период. Плавание в весенне-летний период, так же, как и в осенне-зимний, разделено на три типа: легкий (Л), средний (С) и тяжелый. В основу типизации положен коэффициент трудности плавания $K_т$. Этот коэффициент является отношением эксплуатационной скорости судна на чистой воде к эксплуатационной чистой ледовой скорости на данном участке трассы. Отдельные значения эксплуатационной чистой ледовой скорости вычисляются как частное от деления протяженности участка с «однородными» льдами на время, затраченное на переход. Дадим классификацию типов ледовых условий.

Легкий тип ледовых условий — на акватории района наблюдаются начальные, молодые и однолетние тонкие льды (до 0,7 м), возможно появление и присутствие однолетних средних льдов в количестве до 25 % ($S_{средн} < 25$ %).

Средний тип ледовых условий — на акватории района наблюдаются однолетний средний лед (до 1,2 м) в количестве от 25 % и более ($S_{средн} \geq 25$ %), возможно появление и присутствие однолетних толстых льдов в количестве до 25 % ($S_{толст} < 25$ %).

Тяжелый тип ледовых условий — на акватории района наблюдаются однолетний толстый лед (более 1,2 м), и старые льды в количестве от 25 % ($S_{толст} \geq 25$ %) и более.

На основе анализа и обобщения данных ЕСИМО процентное соотношение легких, средних и тяжелых условий за 50 лет (в период с 1967–2017 гг.) можно определить в виде гистограммы, представленной на рис. 2.

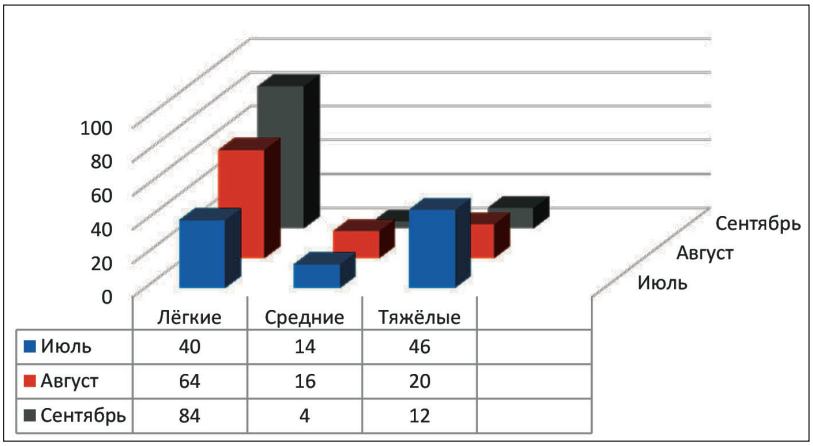
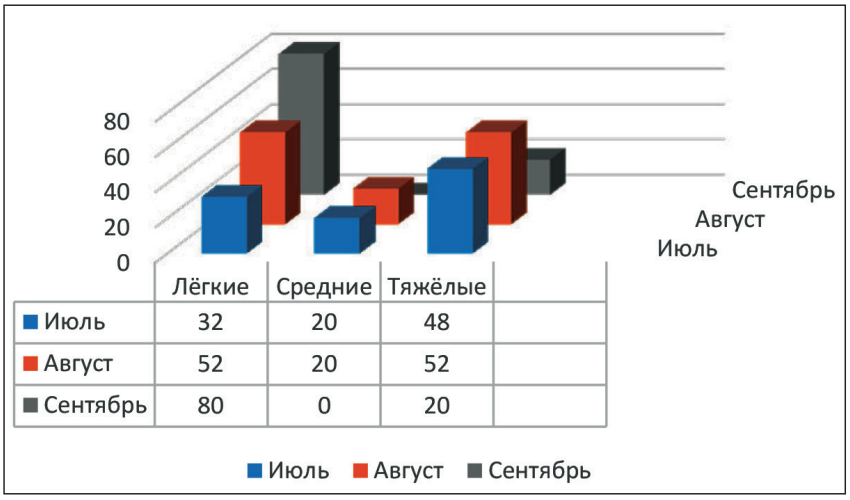


Рис. 2. Процентное распределение типов ледовых условий в период 1967–2017 гг.

При рассмотрении периодов продолжительностью 25 лет: 1967–1992 гг. и 1993–2017 гг., можно наблюдать степень смягчения ледовых условий, особенно в августе и сентябре. Данные за эти периоды представлены на гистограммах рис. 3, на которых отчетливо видно уменьшение количества тяжелых и средних ледовых условий в течение последних 25 лет, при этом в 5 раз уменьшился процент тяжелых условий (сокращение с 20 % до 4 % концентрации льда), а также в 5 раз уменьшился процент средних ледовых условий. Данная статистика вполне подтверждает смягчение климата.

а)



б)

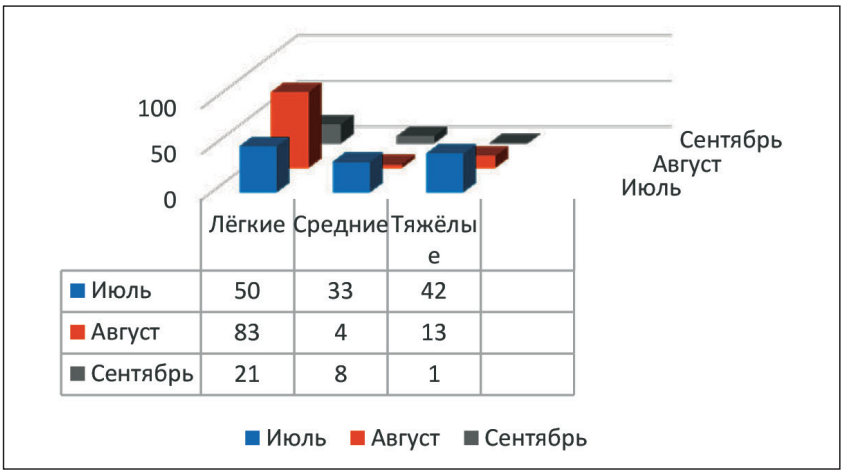


Рис. 3. Процентное распределение типов ледовых условий
а — в период 1967–1992 гг.; *б* — в период 1993–2017 гг.

Возможность работы судов ледового класса. Плавание транспортных судов в ледовых условиях согласно, требованиям Регистра судоходства [12] может происходить как самостоятельно, так и под проводкой ледоколов. При этом необходимо учитывать районы плавания судов и их назначение. По району ледового плавания морские транспортные суда, согласно Правилам Российского морского регистра судоходства, разделяются на две категории:

– арктические суда — разрешено плавание в Баренцевом, Карском морях, море Лаптевых, Восточно-Сибирском и Чукотском морях;

– неарктические суда — разрешено плавание в замерзающих неарктических морях. Кроме того, Российским морским регистром судоходства выделены еще две категории судов: ледоколы и буксиры ледового класса.

Согласно требованиям Российского морского регистра судоходства, под термином «суда ледового плавания» понимаются суда, предназначенные для самостоятельного плавания во льдах (с возможным преодолением ледовых перемычек) или плавания во льдах под проводкой ледокола.

При регламентации условий ледового плавания используются следующие определения:

– *сплоченность* — мера сплошности ледового покрова, характеризуемая отношением площади, занимаемой льдами, к общей площади рассматриваемого участка акватории, оцениваемая по десятибалльной шкале;

– *разреженный лед* — лед сплоченностью 4–6 баллов, в котором отдельные льдины не соприкасаются между собой;

– *сплоченный лед* — лед сплоченностью 7–8 баллов, в котором отдельные льдины соприкасаются между собой, образуя ледовые перемычки;

– *сплошной лед, или ледовое поле* — лед сплоченностью 9–10 баллов.

Согласно требованиям Российского морского регистра судоходства, для гидрографических судов класса Arc5 или ЛУ5 (ледовые усиленные) навигация в Карском море осуществляется согласно требованиям, представленным в табл. 8.

Таблица 8

Допустимая навигация в Карском море для судов класса Arc5

Способ ледового плавания	Период навигации							
	Зимне-весенняя навигация в морях				Летне-осенняя навигация в морях			
	Тип навигации							
	Э	Т	С	Л	Э	Т	С	Л
СП	–	–	–	+	–	+	+	+
ПЛ	–	–	*	+	*	+	+	+

Примечания: ПЛ — плавание под проводкой ледокола; + — эксплуатация допускается; – — эксплуатация не допускается; * — эксплуатация связана с повышенным риском получения повреждений; Э — экстремальная навигация (со средней повторяемостью один раз в 10 лет); Т, С, Л — тяжелая, средняя, легкая навигация (со средней повторяемостью один раз в 3 года) соответственно.

Необходимо отметить, что помимо требований Российского морского регистра судоходства, разработана и другая система оценки возможности плавания судов различных классов во льдах. В настоящее время в Канаде существует система Arctic Ice Regime Shipping System (AIRSS) [13] — система оценки Арктического ледового режима судоходной системы, разработанная Министерством транспорта Канады для минимизации риска загрязнения в Арктике из-за повреждения судов льдом. Результат оценки реализован в виде ледового критерия, или ледовой цифры IN («Ice Numeral» или «Ice Decision Numeral»). Данный показатель получается путем простых расчетов, в которых учитывается специальный ледовый множитель IM (Ice Multiplier) и состояние ледяного покрова моря. Ледовый множитель IM различен для разных ледовых классов судов. Его значение соответствует определенному возрасту льда. Состояние ледового покрова моря определяется возрастом наблюдаемого льда и его концентрацией. Соответствие судов ледового класса Канады и Российского морского регистра судоходства показано в табл. 9.

Таблица 9

Соответствие судов ледового класса Канады и судов ледовых классов Российского морского регистра судоходства в период 1995–2008 гг.

Ледовый класс Канады	A	B	C	D	E	CAC4	CAC3
Ледовый класс Российского морского регистра судоходства 1995 г.	УЛ	Л1	Л2	Л3	Л4	ЛЛ3	ЛЛ2
Ледовый класс Российского морского регистра судоходства 2008 г.	Arc5	Arc4	Ice3	Ice2	Ice1	Icebreaker7	Icebreaker8

Как известно, для гидрографических целей используются суда класса Arc5. В табл. 10 рассмотрены параметры льдов, соответствующие именно этому классу.

Таблица 10

Параметры льдов, соответствующие проходу судов класса Arc5

Тип льда	Толщина льда, см	Тип льда (код ВМО)	Ледовый множитель IM	
			Обозначение	Значение
Многолетний лед	> 300	9•	IMMY	–4
Двухлетний лед	180–280	8•	IMSY	–3
Толстый однолетний лед	> 120	4•	IMTFY	–1
Однолетний лед средней толщины	70–120	1•	IMMFY	1
Однолетний лед второй стадии	50–70	9	IMFY	2
Однолетний лед первой стадии	30–50	8	IMFY	2
Серо-белый лед	15–30	5	IMGW	2
Серый лед	10–15	4	IMG	2
Начальные виды льда	–	1	IMN	2
Нет льда (чисто)	–	0	IMOW	2

Примечание. • — льды толщиной более 70 см.

Возможность плавания по системе AIRSS определяется в четыре шага. *Шаг 1* — определяется, какие типы льда присутствуют в районе плавания и концентрация каждого из них. *Шаг 2* — выбирается ледовый множитель IM в соответствии с рассматриваемым типом судна для каждого из типов льда. *Шаг 3* — рассчитывается ледовый критерий IN по формуле $IN = \sum iC_i IM_i$, где i — тип льда; IM — ледовый множитель; C_i — частная концентрация льда (сплоченность) типа i в десятых долях. *Шаг 4* — используется полученная ледовая цифра (IN) для определения того, может ли идти судно или нужно выбрать другой маршрут. Если значение IN равно нулю или положительному числу, судно может продолжать путь во льду. Если IN меньше нуля, судно должно найти альтернативный маршрут [14].

Рассмотрим примеры расчета ледовой цифры для класса Arc5 (класс «А» по ледовому классу Канады) для разных ледовых условий (рис. 5–7).



Рис. 5. Легкие условия плавания (преобладание чистой воды)

Вначале рассмотрим наиболее легкие условия (см. рис. 5), где преобладает чистая вода: IN = = [CMFY · IMMFY] + [COW · IMOW] = [3 · 1] + [7 · 2] = + 17, где CMFY — однолетний лед средней толщины концентрацией 3/10; IMMFY — ледовый множитель для однолетнего льда средней толщины; COW — концентрация, доля чистой воды в размере 7/10; IMOW — ледовый множитель для чистой воды.

Теперь рассмотрим пример с более тяжелыми условиями (см. рис. 6) : IN = [CTFY · IMTFY] + + [CMFY · IMMFY] + [COW · IMOW] = [4 · –1] + [1 · 1] + [5 · 2] = + 7, где CTFY — толстый однолетний лед концентрацией 4/10; IMTFY — ледовый множитель для толстого однолетнего льда; CMFY — однолетний лед средней толщины концентрацией 1/10; IMMFY — ледовый множитель для однолетнего льда средней толщины; COW — концентрация, доля чистой воды в размере 7/10; IMOW — ледовый множитель для чистой воды.



Рис. 6. Тяжелые ледовые условия плавания

Далее рассмотрим условия, где почти нет чистой воды (см. рис. 7): IN = [CMY · IMMY] + + [CTFY · IMTFY] + [COW · IMOW] = [2 · –4] + [7 · –1] + [1 · 2] = –13, где CMY — многолетний лед концентрацией 2/10; IMMY — ледовый множитель для многолетнего льда; CTFY — толстый однолетний лед концентрацией 7/10; IMTFY — ледовый множитель для толстого однолетнего льда; COW — концентрация, доля чистой воды в размере 1/10; IMOW — ледовый множитель для чистой воды.



Рис. 7. Тяжелые условия плавания
при почти полном отсутствии чистой воды

Обсуждение (Discussion)

Планомерное изучение рельефа дна северных морей России началось после Второй мировой войны силами Гидрографического предприятия Министерства морского флота СССР. Первоочередные работы проводились в 50-е гг. XX в. в южной части Карского моря и вдоль всех побережий. На основе анализа и обобщения материалов промера на кафедре «Гидрография моря» Ленинградского высшего инженерного морского училища имени адмирала С. О. Макарова

совместно с Гидрографическим предприятием была составлена первая детальная батиметрическая карта, а также геоморфологическая карта Карского моря масштаба 1 : 1 000 000 [15]. На сегодняшний день комплект навигационных морских карт (НМК) на Карское море, изданных Управлением навигации и океанографии Министерства обороны Российской Федерации, включает более 200 ед. При этом НМК масштаба 1 : 25 000 и крупнее включает всего 24 листа. Распределение НМК Карского моря по масштабам приведено в табл. 11. Анализ этой таблицы показывает, что основным видом НМК в Карском море являются путевые карты масштабов 1 : 150 000. Морские планы представлены в незначительном количестве и охватывают рейды портопунктов и полярных станций.

Таблица 11

Масштабы навигационных морских карт Карского моря по состоянию на 2014 г.

Виды НМК Масштаб	Масштабы НМК Карского моря на 2014 г.			
	Морские планы 1 : 500–1 : 25 000	Частные карты 1 : 50 000–1 : 100 000	Путевые карты 1 : 100 000–1 : 1 000 000	Генеральные карты 1 : 1 000 000–1 : 5 000 000
Количество НМК	24	70	104	4

По данным AIRSS, при рассмотрении ледового множителя получается, что судно не сможет пройти только в том случае, если толстого однолетнего льда (его ледовый множитель равен –1), будет больше, чем 50 % акватории, а оставшуюся часть пространства будет занимать однолетний лед средней толщины (его ледовый множитель равен единице). В таком случае ледовая цифра будет меньше нуля или на акватории будет большой процент двухлетних или многолетних льдов (их ледовые множители равны –2 и –3 соответственно). Но в ледовой характеристике юго-западной части Карского моря отмечается, что в 80 % случаев к началу сентября район полностью очищается ото льда, а значит, двухлетние и многолетние льды могут образовываться крайне редко.

Для оценки безопасной скорости судна класса Arc5 (А), используется выражение V_s = = 0,0022IN3 – 0,0397IN2 + 0,2834IN + 3,5729 [16]. В среднем в период с июня по январь ледовый критерий равен своему максимальному значению (IN = 20). Это значение равно скорости судна в чистой воде, т. е. скорость судна равна 11 уз.

Для периода с февраля по май ледовый критерий находится в интервале 5–10. Рассчитаем по формуле скорости, соответствующие данным ледовым критериям:

V_s = 0,0022 · 53 – 0,0397 · 52 + 0,2834 · 5 + 3,5729 = 4,2 уз для IN = 5;

V_s = 0,0022 · 103 – 0,0397 · 102 + 0,2834 · 10 + 3,5729 = 4,7 уз для IN = 10.

Скорость, рекомендованная Российским морским регистром судоходства, равна 6–8 уз. Скорости 8 уз примерно соответствует скорость при ледовом критерии, равном 17:

V_s = 0,0022 · 173 – 0,0397 · 172 + 0,2834 · 17 + 3,5729*b* = 7,9 уз.

Заключение (Conclusion)

При рассмотрении карт ледовой обстановки Карского моря, находящихся на сайте ЕСИМО в разделе «региональные карты Евразийской Арктики», можно сделать вывод о том, что требования плавания к судам во льдах по Канадской методике намного мягче, чем те, которые регламентирует Российский морской регистр судоходства. По данным Российского морского регистра судоходства, суда класса Arc5 могут работать в зимне-весенний период только в легких условиях, предусматривающих плавание только в начальных, молодых и однолетних тонких льдах (толщина до 70 см) с включениями однолетнего среднего льда в количестве не более 25 % акватории. Вместе с тем с практической точки зрения, по данным карт ЕСИМО, получается, что суда класса Arc5 в юго-западной части Карского моря могут ходить почти круглогодично, в то время как их гарантированное плавание в северо-восточной части возможно лишь в августе и сентябре. На этом фоне возникает закономерный вывод о необходимости проведения дальнейших

гидрографических исследований в силу сохранившейся до настоящего времени изученности северо-восточной части моря, а также увеличения грузоподъемности современных судов, что влечет за собой сокращение общего объема глубин, безопасных для мореплавания.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Карклин В. П.* Климатическая изменчивость ледяных массивов Карского моря / В. П. Карклин, А. В. Юлин, М. В. Шаратунова, Л. П. Мочнова // Проблемы Арктики и Антарктики. — 2017. — № 4 (114). — С. 37–46.

2. *Карелин И. Д.* Припай и заприпайные полыньи арктических морей сибирского шельфа в конце XX – начале XXI века: режимно-справ. пособие / И. Д. Карелин, В. П. Карклин. — СПб: ААНИИ, 2012. — 180 с.

3. *Клячкин С. В.* Численная модель эволюции ледяного покрова арктических морей для оперативного прогнозирования / С. В. Клячкин, Р. Б. Гузенко, Р. И. Май // Лед и Снег. — 2015. — Т. 55. — № 3. — С. 83–96.

4. *Conkright M. E.* World Ocean Atlas 2001: Objective Analyses, Data Statistics and Figures. CD-ROM Documentation / M. E. Conkright, R. A. Locarnini, H. E. Garcia, T. D. O'Brien, T. P. Boyer, C. Stephens, J. I. Antonov. — National Oceanographic Data Center, Silver Spring, MD, 2002. — 17 p.

5. *Решетняк С. В.* Гидрографическая изученность подводного рельефа арктических морей России / С. В. Решетняк // Геодезия и картография. — 2006. — № 4. — С. 57–60.

6. *Шаронов А. Ю.* Задачи гидрометеорологического обеспечения круглогодичной навигации в Восточно-Сибирском море / А. Ю. Шаронов, В. А. Шматков // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2018. — Т. 10. — № 1. — С. 170–182. DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-1-170-182.

7. *Думанская И. О.* Ледовые условия морей европейской части России / И. О. Думанская. — М.; Обнинск: ИГ–СОЦИН, 2014. — 608 с.

8. Единая Государственная система информации об обстановке в Мировом океане [Электронный ресурс]. — Режим доступа: http://data.oceaninfo.ru/ (дата обращения: 01.11.2018).

9. Наблюдения за ледовой обстановкой: учеб. пособие. — СПб.: ААНИИ, 2009. — 360 с.

10. *Карклин В. П.* Сезонные изменения возрастного состава льдов в северно-восточной части Карского моря в осенне-зимний период / В. П. Карклин, С. В. Хотченков, А. В. Юлин, В. М. Смоляницкий // Проблемы Арктики и Антарктики. — 2016. — № 4 (110). — С. 41–50.

11. *Olason E.* A dynamical model of Kara Sea land-fast ice / E. Olason // Journal of Geophysical Research: Oceans. — 2016. — Vol. 121. — Is. 5. — Pp. 3141–3158. DOI: 10.1002/2016JC011638.

12. Правила классификации и постройки морских судов. — СПб.: Российский морской регистр судоходства, 2010. — Т. 1. — 479 с.

13. AIRSS 1996. Arctic Ice Regime Shipping System (AIRSS) Standards, Transport Canada, TP 12259E, 46 r, Ottawa. Ont., Canada.

14. *Timco G. W.* Canadian Ice Regime System: Improvements Using an Interaction Approach / G. W. Timco, I. Kubat // POAC'01: Proceedings of the International Conference on Port and Ocean Engineering Under Arctic Conditions. — 2001.

15. *Фирсов Ю. Г.* Новый этап батиметрических исследований северных акваторий России на примере Карского моря / Ю. Г. Фирсов, М. В. Иванов, Е. Н. Колосков // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2014. — № 6 (28). — С. 115–124.

16. *Мастрюков С. И.* Методический подход к оценке ледовых условий плавания и оценка тенденций их изменения на примере азиатского побережья Берингова моря / С. И. Мастрюков // Арктика: экология и экономика. — 2012. — № 1 (5). — С. 074–081.

REFERENCES

1. Karklin, V. P., A. V. Yulin, M.V. Sharatunova, and L.P. Mochnova. "Klimaticheskaya izmenchivost' ledyanykh massivov Karskogo moray." *Problemy Arktiki i Antarktiki* 4(114) (2017): 37–46.

2. Karelin, I. D., and V. P. Karklin. *Pripai i zapripainye polyn'i arkticheskikh morei sibirskogo shel'fa v kontse KhKh – nachale XXI veka: Rezhimno-spravochnoe posobie*. SPb: AANII, 2012.

3. Klyachkin, S. V., R. B. Guzenko, and R. I. May. "May. Numerical model of the ice cover evolution in Arctic Seas for the operational forecasting." *Ice and Snow* 55.3 (2015): 83–96.

4. Conkright, M. E., R.A. Locarnini, H. E. Garcia, T. D. O'Brien, T. P. Boyer, C. Stephens, and J. I. Antonov. *World Ocean Atlas 2001: Objective Analyses, Data Statistics and Figures. CD-ROM Documentation*. National Oceanographic Data Center, Silver Spring, MD, 2002.

5. Reshetnyak, S. V. "Hydrographic study of the Arctic sees underwater relief of Russia." *Geodesy and Cartography* 4 (2006): 57–60.

6. Sharonov, Andrei Yu., and Vladimir A. Shmatkov. "The problem of hydrometeorological maintenance of year-round navigation in the East Siberian Sea." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 10.1 (2018): 170–182. DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-1-170-182.

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

8. Edinaya Gosudarstvennaya Sistema Informatsii ob Obstanovke v Mirovom Okeane. Web. 1 Nov. 2018 <http://data.oceaninfo.ru/>.

9. *Nablyudeniya za ledovoi obstanovkoi: ucheb. posobie*. SPb.: AANII, 2009.

10. Karklin, V. P., S. V. Khotchenkov, A. V. Yulin, and V. M. Smolyanitskii. "Sezonnye izmeneniya vozrastnogo sostava l'dov v severno-vostochnoi chasti Karskogo morya v osenne-zimnii period." *Problemy Arktiki i Antarktiki* 4(110) (2016): 41–50.

11. Olason, Einar. "A dynamical model of Kara Sea land-fast ice." *Journal of Geophysical Research: Oceans* 121.5 (2016): 3141–3158. DOI: 10.1002/2016JC011638.

12. *Pravila klassifikatsii i postroiki morskikh sudov*. Vol. 1. SPb.: Rossiiskii morskoi registr sudokhodstva, 2010.

13. AIRSS 1996. Arctic Ice Regime Shipping System (AIRSS) Standards, Transport Canada, TP 12259E, 46 r, Ottawa. Ont., Canada.

14. Timco, G. W., and Ivana Kubat. "Canadian Ice Regime System: Improvements Using an Interaction Approach." *Proceedings of the International Conference on Port and Ocean Engineering Under Arctic Conditions*. 2001.

15. Firsov, Yu. G. "The new stage of the Russian northern basins bathymetric investigations – Kara sea example." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 6(28) (2014): 115–124.

16. Mastrukov, S. "Methodical Approach to the Estimation of Ice Conditions of Navigation and Trends of Change as an Example of the Asian Coast of the Bering Sea." *Arctic: ecology and economy* 1(5) (2012): 074–081.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ	INFORMATION ABOUT THE AUTTHORS
Иванов Роман Владимирович — аспирант *Научный руководитель*: Шматков Владимир Антонович — доктор технических наук, профессор ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова» 198035, Российская Федерация, Санкт-Петербург, ул. Двинская, 5/7 e-mail: *answerwww@yandex.ru*	**Ivanov, Roman V.** — Postgraduate *Supervisor*: Shmatkov, Vladimir A. — Dr. of Technical Sciences, professor Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping 5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg, 198035, Russian Federation e-mail: answerwww@yandex.ru
Полубелов Денис Алексеевич — аспирант *Научный руководитель*: Шматков Владимир Антонович — доктор технических наук, профессор ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова» 198035, Российская Федерация, Санкт-Петербург, ул. Двинская, 5/7 e-mail: *hydrohwhite@gmail.com*	**Polubelov, Denis A.** — Postgraduate *Supervisor*: Shmatkov, Vladimir A. — Dr. of Technical Sciences, professor Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping 5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg, 198035, Russian Federation e-mail: hydrohwhite@gmail.com
Соболева Анастасия Александровна — помощник геодезиста ООО «Тоннельтехнология» e-mail: *soboleva_nastya1997@mail.ru*	**Soboleva, Anastasiya A**. — Surveyor assistant LLC Tunnel technology e-mail: *soboleva_nastya1997@mail.ru*

Статья поступила в редакцию 30 ноября 2018 г.
Received: November 30, 2018.

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

DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-6-1225-1233

RESEARCH OF CHANGES IN THE TRANSPORT FLEET STRUCTURE IN THE WATER AREA OF THE NORTHERN SEA ROUTE

E. O. Ol'khovik

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

The issues related to the formation of sea traffic flows in the waters of the Northern Sea Route are discussed in the paper. The work is a part of complex researches, which are conducted at the Arctic Faculty of the Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping on the problems of navigation and hydrographic support of shipping in the Arctic. A list of the main directions on which the traffic flows in the Arctic seas of the Russian Federation are studying is given. It is noted that data of objective quantitative and qualitative control on the position of vessels and the parameters of their movement (speed, course, geographical position) underlie the study of traffic flows in the water area of the Northern Sea Route, like any other transport system. Vessel identification and objective control over the parameters of their movement with a given reliability, accuracy, completeness and frequency are achieved using automated satellite identification systems. The method of information collection , its processing and analysis of changes in the main quantitative indicators of the traffic flows in the water area of the Northern Sea Route, relating to the period from 2014 to 2018, is described. The results of the statistical data processing describing the change in the structure of the Arctic transport fleet, which forms the transport flow, are presented. The distribution of macroindicators of three groups of transport vessels is studied: group 1 - ships with categories Arc7,8; Group 2 - ships with categories Arc4,5; Group 3 - vessels with categories of ice strengthening Ice 1,2,3, as well as vessels that do not have an ice category. The quantitative indicators characterizing the state of the structure of the Arctic transport fleet and the trends of its change are determined. The main directions of further research are outlined.

Keywords: the Northern Sea Route, quantitative indicators, traffic flow, statistical data.

For citation:
Ol'khovik, Evgeniy O. "Research of changes in the transport fleet structure in the water area of the Northern Sea Route." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 10.6 (2018): 1225–1233. DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-6-1225-1233.

УДК 528.47

ИССЛЕДОВАНИЕ ИЗМЕНЕНИЯ СТРУКТУРЫ ТРАНСПОРТНОГО ФЛОТА В АКВАТОРИИ СЕВЕРНОГО МОРСКОГО ПУТИ

Е. О. Ольховик

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

В статье рассмотрены вопросы, связанные с формированием морских транспортных потоков в акватории Северного морского пути. Работа представляет собой часть комплексных исследований, которые проводятся на Арктическом факультете Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова и посвящены проблемам исследования навигационно-гидрографического обеспечения судоходства в Арктике. Приводится перечень основных направлений, по которым ведется изучение транспортных потоков в арктических морях Российской Федерации. Отмечается, что в основе изучения транспортных потоков в акватории Северного морского пути, как и любой другой транспортной системы, лежат данные объективного количественного и качественного контроля за положением судов и параметрами их движения (скорость, курс, географическое положение). Идентификация судов и объективный контроль за параметрами их движения с заданной достоверностью, точностью, полнотой и периодичностью достигаются с использованием автоматизированных идентификационных спутниковых систем. Описывается методика сбора информации, ее обработки и анализа изменений основных количественных показателей транспортных потоков в акватории Северного морского пути, относящихся к периоду 2014 – 2018 гг. Приводятся результаты обработки статистических данных, характеризующих

изменение структуры арктического транспортного флота, формирующего транспортный поток. Исследовано распределение макропоказателей трех групп транспортных судов: 1-я группа — суда с категориями Arc7,8; 2-я группа — суда с категориями Arc4,5; 3-я группа — суда с категориями ледовых усилений Ice 1,2,3, а также суда, не имеющие ледовой категории. Определены количественные показатели, характеризующие состояние структуры арктического транспортного флота и тенденции ее изменения. Намечены основные направления дальнейших исследований.

Ключевые слова: Северный морской путь, количественные показатели, транспорный поток, статистические данные.

Для цитирования:
Ольховик Е. О. Исследование изменения структуры транспортного флота в акватории Северного морского пути / Е. О. Ольховик // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2018. — Т. 10. — № 6. — С. 1225–1233. DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-6-1225-1233.

Введение (Introduction)

В акватории Северного морского пути (СМП) в ближайшей перспективе будут сформированы устойчивые транспортные потоки. В настоящее время идет процесс изменения структуры арктического флота, а также ввод новых крупнотоннажных судов высокого ледового класса, направленный на увеличение объема морских грузоперевозок по трассам СМП. Параллельно со строительством и вводом в эксплуатацию новых судов и расширением сети судоходных маршрутов, а также разработкой графиков движения судов и решением других практических задач [1]–[3] ведутся теоретические исследования, напраленные на создание теории морских транспортных потоков в акватории СМП [4].

Общие принципы теории транспортных потоков (ТП), разработаные в 60-е гг. XX в. [5], были основаны в основном на исследовании динамических процессов, происходящих на автомобильных дорогах. Теория ТП направлена на исследование режимов движения транспортных средств (ТС) в различных условиях, зависящих от их характеристик, влияния погодных условий и других факторов. В теории ТП разрабатываются модели, в которых рассматривается движение не отдельных ТС, а их групп, объединенных понятием «поток». В качестве основных измеряемых параметров потоков используются три измеряемых параметра: *скорость потока*, *интенсивность потока* и *плотность потока* [6]. Исследование функциональных связей между этими параметрами позволяют объяснить динамические процессы, происходящие в потоке при сужении дороги, изменении внешних условий, а также при различных режимах его регулирования [7].

В теории ТП вопросы, связанные с экономикой, напрямую не рассматриваются. Изучение транспортных потоков в акватории СМП ведется по следующим основным направлениям:

– скоростные режимы движения судов по маршрутам СМП [8];
– влияние мелководья и льда на формирование сети безопасных судоходных маршрутов [9]–[11];
– межсезонная изменчивость пропускной способности СМП и отдельных его частей [12];
– структура и состав арктического транспортного флота [13];
– ледокольное обеспечение арктического судоходства [13], [14].

В основе изучения ТП СМП, как и любой другой транспортной системы, лежат данные объективного контроля за положением судов, данные объективного контроля их идентификации, и данные объективного контроля параметров их движения. Принципиально важным остается вопрос о достоверности, точности, полноте и периодичности получаемой информации. До недавнего времени сбор сведений о судах, находящихся в акватории арктических морей, а также их скорости и направлении движения представлял собой практически неразрешимую задачу. С появлением автоматизированных спутниковых информационных систем [4] проблема сбора экспериментальных данных была решена.

Настоящая работа посвящена описанию методики сбора информации и ее обработки, а также анализу изменений основных количественных показателей ТП СМП, произошедших за период 2014–2018 гг. Работа представляет собой часть комплексных исследований по проблемам навигацион-но-гидрографического обеспечения судоходства в акватории СМП, которые проводятся на Арктическом факультете ГУМРФ им. адм. С. О. Макарова.

Методы и материалы (Methods and materials)

В качестве основных источников информации о количестве транспортных судов, находящихся в акватории СМП, и их тоннаже использовались сведения, размещенные на сайтах Администрации СМП [15], глобальной автоматизированной системы мониторинга морских и смешанного (река – море) плавания судов «Виктория» [16], морских сервисов ГК «Сканэкс» [17].

Все транспортные суда были объединены в три группы.

Первую группу составляли суда, имеющие класс ледового усиления Arc 7, 8. В эту группу в основном входили танкеры и контейнеровозы, работающие в Карском море в режиме круглогодичной навигации. Такие суда в наименьшей степени нуждаются в ледокольном обеспечении.

Вторую группу составляли суда, имеющие класс ледового усиления Arc 4, 5. Такие суда, согласно требованиям Российского морского регистра судоходства [15], с декабря по июль при среднем типе ледовых условий не допускаются в плавание в Карском море даже под проводкой ледоколов. При легком типе ледовых условий зимней навигации и практически при любых типах ледовых условий летней навигации они могут совершать самостоятельное плавание либо плавание под проводкой ледоколов.

В третью группу судов вошли суда без ледовых усилений Ice0 (использована нестандартная абривиатура), а также суда с категориями ледовых усилений Ice1, Ice2 и Ice3. Эксплуатация таких судов в акватории СМП разрешена только в период летней навигации с июля по 15 ноября при легком типе ледовых условий. При этом танкерам, газовозам и химовозам валовой вместимостью 10000 т и более даже по чистой воде разрешается плавание только в сопровождении ледоколов.

Для каждого месяца (I — январь; II — февраль; III — декабрь) подсчитывалось количество судов каждой из трех выделенных групп судов, а также общее количество судов каждой группы за год $N_j = \sum n_{ij}$, где i — номер месяца (i = 1 – 12), j — номер группы судов (j = 1 – 3). Для каждого месяца (I — январь; II — февраль; III — декабрь) подсчитывался также общий тоннаж судов каждой из трех выделенных групп судов и общий тоннаж судов за год: $D_w = \sum d_{ij}$, где i — номер месяца (i = 1–12), j — номер группы судов (j = 1 – 3).

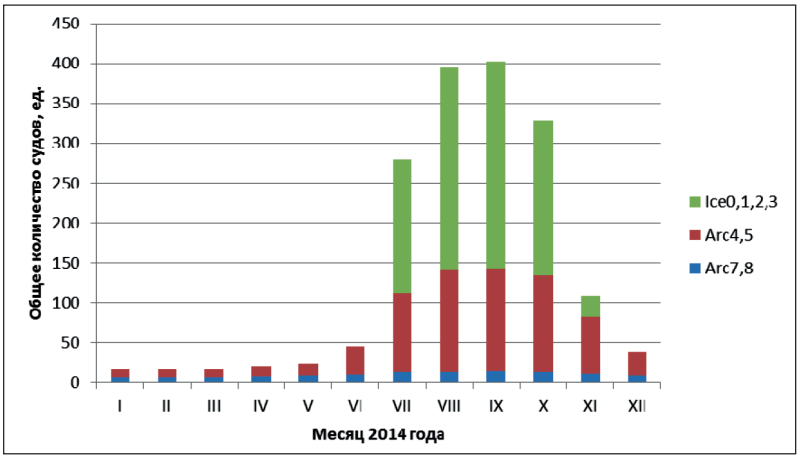
Результаты (Results)

По результатам подсчетов строились гистограммы распределения по месяцам общего количества судов для. На рис. 1 представлены гистограммы ежемесячного распределения количества судов по группам для 2014, 2017 и 2018 гг. соответственно. По вертикальным осям гистограмм указано общее количество судов, по горизонтальным — месяц года. Цветом выделена каждая из трех групп судов.

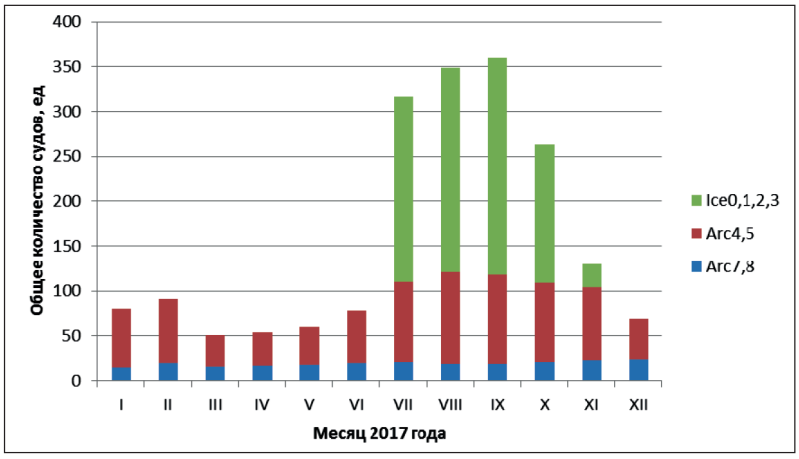
В 2014 г. (см. рис. 1, *а*) в акватории СМП суда категорий Arc 7, 8 и Arc 4, 5 находились круглый год, суда категорий Ice-0, 1, 2 и 3 — только в период летней навигации (с июля по 15 ноября). Максимальное количество судов приходилось на сентябрь и достигало 402 ед. В зимние месяцы (с января по март) общее количество судов уменьшалось до минимального значения, равного 16 ед. На протяжении года количество судов категорий Arc 7, 8 изменялось от шести еденицы в январе – марте до 14 ед. в сентябре. Количество судов категорий Arc 4, 5 изменялось от десяти единиц в январе – марте до 128 ед. в августе – сентябре. Количество судов третьей группы (Ice-0, 1, 2 и 3) в разрешенный для этих судов навигационный период изменялось от 167 ед. в июле до 260 ед. в сентябре с последующим уменьшением до 26 ед.

В 2017 г. (см. рис. 1, *б*) в акватории СМП суда категорий Arc 7, 8 и Arc 4, 5 находились круглый год, суда категорий Ice-0, 1, 2 и 3 работали только в период летней навигации (с июля по 15 ноября). Максимальное количество судов приходилось на сентябрь и достигало 360 ед. В зимние месяцы (с января по март) общее количество судов уменьшалось до минимального значения, равного 51 ед. На протяжении года количество судов категорий Arc 7, 8 изменялось от 14 ед. в январе до 23 ед. в декабре. Количество судов категорий Arc 4, 5 изменялось от 36 ед. в марте до 103 ед. в августе. Количество судов третьей группы (Ice-0, 1, 2 и 3) в разрешенный для таких судов навигационный период изменялось от 206 ед. в июле до 242 ед. в сентябре с последующим уменьшением до 26 ед.

а)



б)



в)

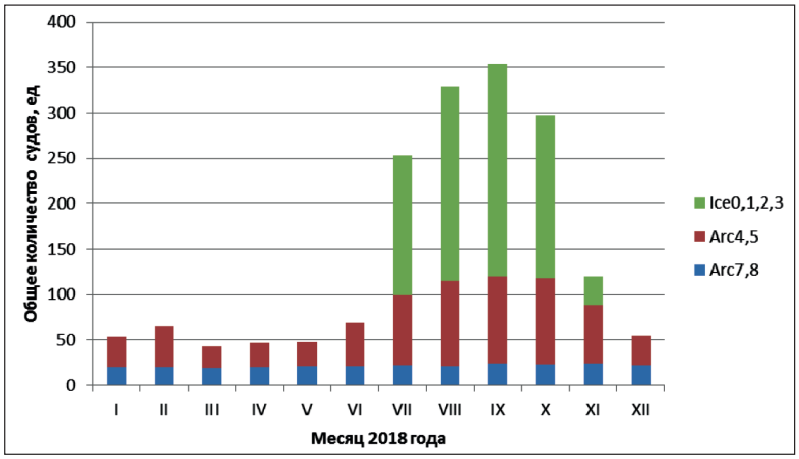


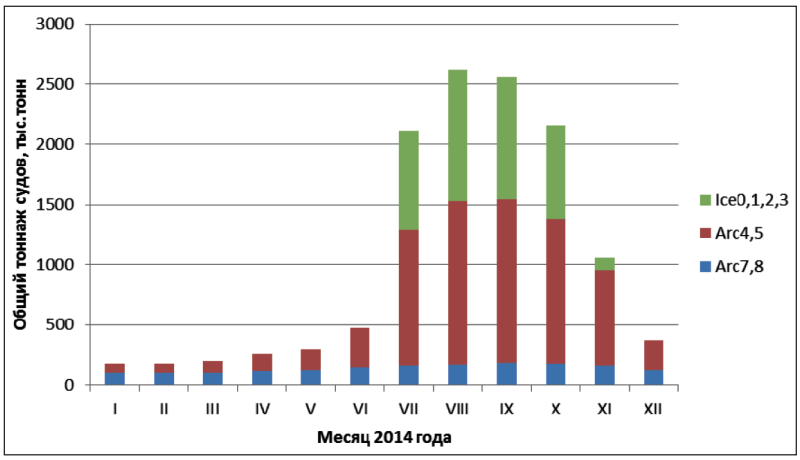
Рис. 1. Распределение общего количества групп судов по месяцам: *а* — 2014 г.; *б* — 2017 г.; *в* — 2018 г.

В 2018 г. (см. рис. 1, *в*) в акватории СМП суда категорий Arc 7, 8 и Arc 4, 5 находились круглый год, суда категорий Ice-0, 1, 2 и 3 работали только в период летней навигации (с июля по 15 ноября). Максимальное количество судов приходилось на сентябрь и достигало 354 ед. В марте общее количество судов уменьшалось до минимального значения, равного 43 ед. На протяжении года количество судов категорий Arc 7, 8 изменялось от 19 ед. в марте до 24 ед. в ноябре. Наблюдалось изменение количества судов категорий Arc 4, 5 от 24 в марте до 96 ед. в сентябре. Количество судов третьей

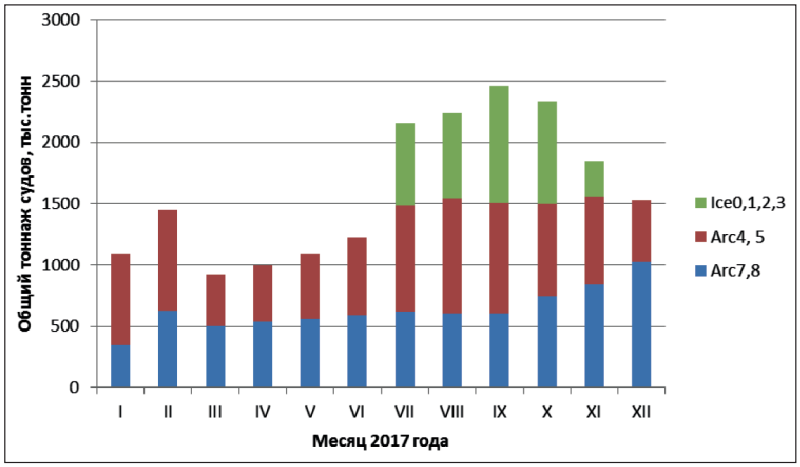
группы (Ice-0, 1, 2 и 3) в разрешенный для таких судов навигационный период изменялось от 154 ед. в июле до 234 ед. в сентябре с последующим уменьшением до 32 ед.

Наряду в подсчетом количества судов, находящихся в акватории СМП, оценивался их тоннаж. На рис. 2 показаны результаты проведенного исследования в виде гистограмм, соответствующих распределению тоннажа судов по группам для 2014, 2017 и 2018 гг. соответственно. По вертикальным осям гистограмм отложено значение общего тоннажа судов, по горизонтальным — месяц года. Цветом выделена каждая из трех групп судов.

а)



б)



в)

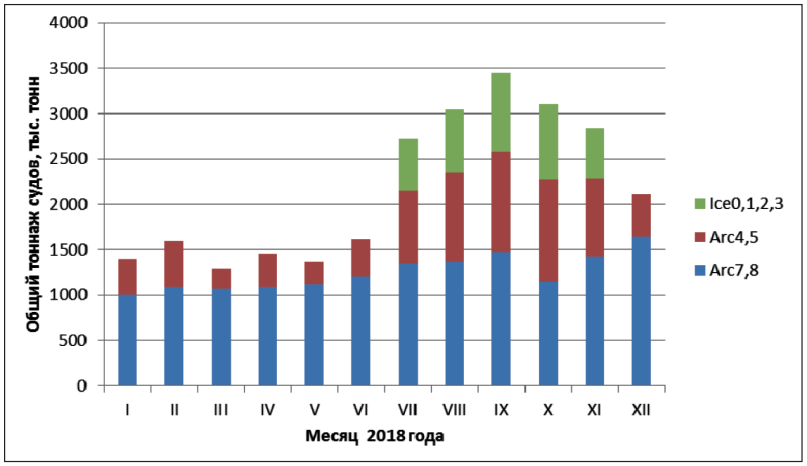


Рис. 2. Распределение общего тоннажа групп судов по месяцам:
а — 2014 г.; *б* — 2017 г.; *в* — 2018 г.

В 2014 г. (см. рис. 2, *а*) максимальное значение общего тоннажа судов, равное 2619 тыс. т, было зафиксировано в августе. В январе – феврале тоннаж судов достиг минимального значения в 179 тыс. т. На протяжении 2014 г. общий тоннаж судов категорий Arc7, 8 изменялся от 100 тыс. т в январе – марте до 182 тыс. т в сентябре. Общий тоннаж судов категорий Arc4, 5 изменялся от 79 тыс. т в январе – феврале до 1363 тыс. т в августе – сентябре. Общий тоннаж судов третьей группы (Ice-0, 1, 2 и 3) в разрешенный для таких судов навигационный период изменялся от 827 тыс. т в июле до 1086 тыс. т в августе с последующим уменьшением до 105 тыс. т в ноябре.

В 2017 г. (см. рис. 2, *б*) максимальное значение общего тоннажа судов, равное 2463 тыс. т, было зафиксировано в сентябре. В марте тоннаж судов достиг минимального значения, равного 920 тыс. т. На протяжении 2017 г. общий тоннаж судов категорий Arc7, 8 изменялся от 348 тыс. т в январе до 1023 тыс. т в декабре. Общий тоннаж судов категорий Arc 4, 5 изменялся от 418 тыс. т в марте до 943 тыс. т в августе. Общий тоннаж судов третьей группы (Ice-0, 1, 2 и 3) в разрешенный для таких судов навигационный период изменялся от 672 тыс. т в июле до 956 тыс. т в сентябре с последующим уменьшением до 291 тыс. т в ноябре.

В 2018 г. (см. рис. 2, *в*) максимальное значение общего тоннажа судов, равное 3447 тыс. т, было зафиксировано в сентябре. В марте тоннаж судов достиг минимального значения, равного 1285 тыс. т. На протяжении 2018 г. общий тоннаж судов категорий Arc7,8 изменялся от 1005 тыс. т в январе до 1643 тыс. т в декабре. Общий тоннаж судов категорий Arc4,5 изменялся от 214 тыс. т в марте до 1122 тыс. т в октябре. Общий тоннаж судов третьей группы (Ice-0, 1, 2 и 3) в разрешенный для таких судов навигационный период изменялся от 575 тыс. т в июле до 871 тыс. т в сентябре с последующим уменьшением до 553 тыс. т в ноябре.

Обсуждение (Discussion)

На рис. 3, *а* приведены гистограммы распределения количества судов по каждой из трех групп судов, относящиеся к 2014, 2017 и 2018 гг. По вертикальной оси гистограммы отложено количество эксплуатируемых судов, по горизонтальной отложен год, к которому относится подсчитанное количество эксплуатируемых на линии судов. Соответствующим цветом выделена каждая из трех групп судов.

а) б)

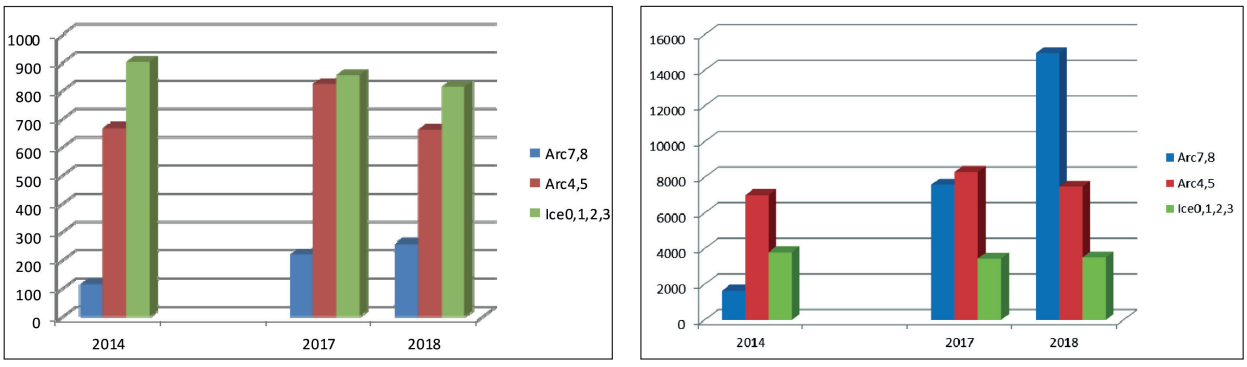


Рис. 3. Распределение общего количества групп судов по годам (*а*), распределение общего тоннажа групп судов по годам (*б*)

Анализ полученных данных по количеству судов рассматриваемых трех групп (см. рис. 3, *а*) не позволяет выделить каких-либо выраженных тенденций изменения структуры транспортного потока в акватории СМП за период 2014 – 2018 гг. На рис. 3, *б* показаны результаты распределения тоннажа судов каждой из групп, относящиеся к 2014, 2017 и 2018 гг. По вертикальной оси гистограммы отложено значение тоннажа, по горизонтальной — год, к которому относится подсчитанный тоннаж. Соответствующим цветом выделена каждая из трех групп судов.

Данные по тоннажу (см. рис. 3, *б*) позволяют отметить, что общий тоннаж судов категорий Arc 4, 5 и Ice-0, 1, 2, 3 в течение 2014, 2017 и 2018 гг. существенно не изменялся, тогда как тоннаж судов категорий Arc 7, 8 за этот период резко увеличивался: 2014 г. — 1648 тыс. т; 2017 г. — 7597 тыс. т; 2018 г — 14976 тыс. т. Доля тоннажа судов категорий Arc 7 и 8 по годам характеризуется следующими показателями: 2014 г. — 13,2 %; 2017 г. — 39,3 %; 2018 г. — 57,7 %. Увеличение общего тоннажа судов, находящихся в акватории СМП в 2017–2018 гг., связано с вводом в эксплуатацию газовозов проекта «Yamalmax».

Выполнено сравнение результатов исследований с работами авторов [18], [19], в которых был проведен анализ сезонных отклонений количества судов различного назначения по всей Арктике (севернее 67° с. ш.), включая рыболовные суда, которые в данной статье не рассматриваются. Сравнив данные из разных источников, можно сделать вывод о том, что российский сектор Арктики и СМП в последние годы получили максимальное развитие судоходства. Предложенные в работе методы для количесвенной оценки морских транспортных потоков являются перспективными и используются для акваторий южных морей [20], [21], однако наличие ледовой обстановки и использование ледокольных проводок накладывают определенные ограничения и дополнения в общую модель.

Выводы (Summary)

На основе проведенного подробного анализа можно сделать следующие выводы:

1. Полученные данные об изменении основных количественных показателей за период 2014–2018 гг., позволяют на макроуровне оценить изменения в структуре флота, формирующего транспортный поток в акватории СМП.

2. Показано, что при моделировании морских транспортных потоков целесообразно учитывать не только количество судов определенного типа, но и их тоннаж.

3. Результаты исследования будут использованы при построении модели морской арктической транспортной системы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

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

2. Справка о Комплексном проекте развития Северного морского пути до 2030 года [Электронный ресурс]. — Режим доступа: http://government.ru/orders/selection/405/18405/ (дата обращения: 14.12.2018).

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

4. *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.

5. *Дрю Д.* Теория транспортных потоков и управление ими / Д. Дрю. — М.: Транспорт, 1972. — 424 с.

6. *Горев А. Э.* Транспортное моделирование / А. Э. Горев, К. Беттгер, А. В. Прохоров, Р. Р. Гизатуллин. — СПб.: СПбГАСУ, 2015. — 168 с.

7. *Семенов В. В.* Смена парадигмы в теории транспортных потоков / В. В. Семенов. — М.: ИПМ им. М. В. Келдыша РАН. — Проект № 04-01-00510, 05-01-00852. — 27 с.

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

10. *Тезиков А. Л.* Гидрографическая изученность акватории Северного морского пути / А. Л. Тезиков, А. Б. Афонин, Е. О. Ольховик // Транспорт Российской Федерации. — 2018. — № 2 (75). — С. 19–21.

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

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

13. *Рукша В. В.* Структура и динамика грузоперевозок по Северному морскому пути: история, настоящее и перспективы / В. В. Рукша, М. С. Белкин, А. А. Смирнов, В. Г. Арутюнян // Арктика: экология и экономика. — 2015. — № 4 (20). — С. 104–110.

14. *Меньшиков В. И.* Проблемы безопасного мореплавания в сложных навигационных условиях стесненных вод / В. И. Меньшиков, А. Н. Суслов, В. В. Шутов. — Мурманск: Изд-во МГТУ, 2013. — 186 с.

15. Сайт Администрации Северного морского пути [Электронный ресурс]. — Режим доступа: http://www.nsra.ru/ru/glavnaya/novosti/n19.html (дата обращения: 12.12.2018).

16. Глобальная автоматизированная система мониторинга морских и смешанного (река-море) плавания судов «Виктория» [Электронный ресурс]. — Режим доступа: https://www.marsat.ru/real-time-vessel-monitoring-system-victoria (дата обращения: 01.12.2018).

17. Морской портал Сканэкс [Электронный ресурс]. — Режим доступа: http://www.scanex.ru/cloud/maritime/ (дата обращения: 18.10.2018).

18. *Eriksen T.* Vessel tracking using automatic identification system data in the Arctic / T. Eriksen, Ø. Olsen // Sustainable Shipping in a Changing Arctic. — Springer, Cham, 2018. — Pp. 115–136. DOI: 10.1007/978-3-319-78425-0_7.

19. *Olsen Ø.* Predicting near future vessel traffic conditions in the Arctic using data from AISSat-1 / Ø. Olsen, A. N. Skauen, O. Helleren // Arctic Frontiers. — 2014.

20. *Smestad B. B.* A Study of Satellite AIS Data and the Global Ship Traffic Through the Singapore Strait: Master thesis / B. B. Smestad. — NTNU, 2015. — 177 p.

21. *Le Tixerant M.* How can Automatic Identification System (AIS) data be used for maritime spatial planning? / M. Le Tixerant, D. Le Guyader, F. Gourmelon, B. Queffelec // Ocean & Coastal Management. — 2018. — Vol. 166. — Pp. 18–30. DOI: 10.1016/j.ocecoaman.2018.05.005.

REFERENCES

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

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

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

4. 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.

5. Dryu, D. *Teoriya transportnykh potokov i upravlenie imi*. M.: Transport, 1972.

6. Gorev, A. E., K. Bettger, A. V. Prokhorov, and R. R. Gizatullin. *Transportnoe modelirovanie*. SPb.: SPbGASU, 2015.

7. Semenov, V. V. *Smena paradigmy v teorii transportnykh potokov*. M.: IPM im. M.V. Keldysha RAN. Proekt №№ 04-01-00510, 05-01-00852.

8. 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.

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

10. Tezikov, A. L., A. B. Afonin, and Ye. O. Olkhovik. "The state of hydrographic exploration of the Northern Sea Route water area." *Transport of Russian Federation* 2(75) (2018): 19–21.

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

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

13. Ruksha, V. V., M. S. Belkin, A. A. Smirnov, and V. G. Arutyunyan. "Structure and dynamics of cargo transportation along the Northern Sea Route: the history, present and prospects." *Arctic: ecology and economy* 4(20) (2015): 104–110.

14. Men'shikov, V. I., A. N. Suslov, and V. V. Shutov. *Problemy bezopasnogo moreplavaniya v slozhnykh navigatsionnykh usloviyakh stesnennykh vod*. Murmansk: Izd-vo MGTU, 2013.

15. Sait Administratsii Severnogo morskogo puti. Web 12 Dec. 2018 <http://www.nsra.ru/ru/glavnaya/novosti/n19.html>.

16. Global'naya avtomatizirovannaya sistema monitoringa morskikh i smeshannogo (reka-more) plavaniya sudov «Viktoriya». Web. 1 Dec. 2018 <https://www.marsat.ru/real-time-vessel-monitoring-system-victoria>.

17. Morskoi portal Skaneks. Web. 18 Oct. 2018 <http://www.scanex.ru/cloud/maritime/>.

18. Eriksen, Torkild, and Øystein Olsen. "Vessel tracking using automatic identification system data in the Arctic." *Sustainable Shipping in a Changing Arctic*. Springer, Cham, 2018. 115–136. DOI: 10.1007/978-3-319-78425-0_7.

19. Olsen, Øystein, Andreas Nordmo Skauen, and O. Helleren. "Predicting near future vessel traffic conditions in the Arctic using data from AISSat-1." *Arctic Frontiers* (2014).

20. Smestad, Bjørnar Brende. *A Study of Satellite AIS Data and the Global Ship Traffic Through the Singapore Strait*. MS thesis. NTNU, 2015.

21. Le Tixerant, M., D. Le Guyader, F. Gourmelon, and B. Queffelec. "How Can Automatic Identification System (AIS) Data Be Used for Maritime Spatial Planning?." *Ocean & Coastal Management* 166 (2018): 18–30. DOI: 10.1016/j.ocecoaman.2018.05.005.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

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

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

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

Статья поступила в редакцию 12 декабря 2018 г.
Received: December 12, 2018.

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

DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-6-1234-1243

INVESTIGATION OF WATER STRUCTURE AND ITS OXYGEN STABILIZATION

S. P. Zubrilov

Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping,
Saint-Petersburg, Russian Federation

An approach is presented to the solution of the problem of improving the physical and chemical properties of water when it is cleaned of contamination by a non-reagent ultrasonic, cavitation method and its development and improvement by using structural concepts on the stabilization of local volumes of water by oxygen obtained as a result of decomposition of water molecules under the action of cavitation. The object of research is contaminated waters of ships, ports, industrial enterprises, cities and towns. The subject of the research is the phenomenon of the stabilization of water by oxygen and its effect on the physical, chemical properties of water and the possibility of its use for the purification of polluted waters without the use of chemical reagents. During the research, experimental methods were used: thermodynamic, nuclear magnetic resonance, differential thermal, infrared spectroscopy ... The local structure of water is stabilized with oxygen: the heat of dissolution of water samples that have undergone cavitation treatment in comparison with the control samples is reduced. Sparging oxygen into control samples without treatment also reduces the heat of dissolution. The time of spin-lattice relaxation of samples processed by ultrasound in the cavitation regime decreases, the spectral analysis of the processed water samples on infrared spectrophotometers has confirmed the stabilization of water by oxygen. The processes and phenomena of water stabilization with oxygen are theoretically and experimentally substantiated. Oxygen was obtained as a result of the decomposition of water molecules in ultrasonic cavitation fields. Stabilization is ensured by high oxygen paramagnetism in the local aquatic associate. A new economical way to control the properties of liquid media with small doses of oxygen using ultrasound in cavitation mode is patented and used for the purification of polluted waters of ships, ports of industrial enterprises, cities and towns, improving the properties of concretes, water-fuel emulsions, saving of cement and fuel.

Keywords: water, structure, components, stabilization, oxygen, pollution, xenobiotics, cleaning methods, fluid properties, non-reagent water treatment.

For citation:
Zubrilov, Sergey P. "Investigation of water structure and its oxygen stabilization." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 10.6 (2018): 1234–1243. DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-6-1234-1243.

УДК 502.656.628

ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРЫ ВОДЫ И ЕЕ СТАБИЛИЗАЦИЯ КИСЛОРОДОМ

С. П. Зубрилов

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

Представлен подход к решению проблемы улучшения физических и химических свойств воды при ее очистке от загрязнений безреагентным ультразвуковым, кавитационным методом, его развитие и совершенствование путем использования структурных представлений о стабилизации локальных объемов воды кислородом, полученным в результате разложения молекул воды под действием кавитации. Объектом исследований являются загрязненные воды судов, портов, промышленных предприятий, городов и поселков, предметом исследований послужило явление стабилизации воды кислородом и ее влияние на физические, химические свойства воды и возможность его использования для очистки загрязненных вод без применения химических реагентов. При проведении исследований использованы экспериментальные методы: термодинамический, ядерно-магнитного резонанса, дифференциально-термический, инфракрасная спектроскопия. Приведено доказательство стабилизации локальной структуры воды кислородом: снижение теплоты

растворения проб воды, прошедших кавитационную обработку по сравнению с контрольными пробами. Барботаж кислородом контрольных проб без обработки также способствует снижению теплоты растворения. Снижается время спин-решеточной релаксации проб, обработанных ультразвуком в режиме кавитации. Спектральный анализ обработанных проб воды на инфракрасных спектрофотометрах подтвердил стабилизацию воды кислородом. Теоретически и экспериментально обоснованы процессы и явления стабилизации воды кислородом. Кислород получен в результате разложения молекул воды в ультразвуковых кавитационных полях. Стабилизация обеспечивается высокой парамагнитностью кислорода в локальном водном ассоциате. Новый экономичный способ управления свойствами жидких сред малыми дозами кислорода с помощью ультразвука в режиме кавитации запатентован и используется для очистки загрязненных вод судов, портов промышленных предприятий, городов и поселков, улучшения свойств бетонов, водно-топливных эмульсий, экономии цемента, топлива.

Ключевые слова: вода, структура, компоненты, стабилизация, кислород, загрязнения, ксенобиотики, методы очистки, свойства жидкости, безреагентная очистка воды.

Для цитирования:
Зубрилов С. П. Исследование структуры воды и ее стабилизация кислородом / С. П. Зубрилов // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2018. — Т. 10. — № 6. — С. 1234–1243. DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-6-1234-1243.

Введение (Introduction)

Проблема загрязнения пресной, и особенно питьевой воды, даже в такой многоводной стране как Россия, на сегодня признана кризисной. Очистка воды от загрязнений: физических, химических, бактериологических, радиационных, а также инструментальный контроль качества воды и поиск эффективных технологий является актуальной задачей на объектах водного транспорта [1]. Положение усугубляется загрязнениями воды ксенобиотиками [2], [3].

В работе [4] исследована динамика экологического состояния практически всех крупных рек России, особенно зон их устьевых участков. Исследования выполнены в соответствии с «Рекомендациями по оценке риска антропогенного воздействия приоритетных загрязняющих веществ на поверхностные воды суши» (М.: Метеоагенство Росгидромет, 2006). Использованы многолетние данные (за последние 30 лет) Государственной службы наблюдения за состоянием окружающей среды. Отмечен повсеместный сдвиг состояния рек от «естественного», «равновесного», к «кризисному» и «критическому». Убедительным подтверждением являются данные, приведенные в табл. 1 о состоянии окружающей среды от г. Тверь до г. Астрахань по р. Волге.

Таблица 1

Данные о состоянии окружающей среды за последние 30 лет Государственной службы наблюдения

Средний многолетний расход воды, $м^3/с$	Показатели качества	Количество	Средняя за период концентрация x, мг/л	Концентрация различной обеспеченности, мг/л		
				X_{95}	X_5	$X_{макс}$
р. Волга — г. Тверь						
156	Нефтепродукты	77	0,16	0,18	0,44	0,76
	Фенолы	77	0,002	0	0,033	0,13
	Медь	40	0,005	0,002	0,009	0,035
р. Волга — г. Конаково						
232	Нефтепродукты	118	0,79	0,07	2,9	4,44
	Фенолы	113	0,003	0,001	0,013	0,017
	Медь	79	0,002	0	0,01	0,02
	Цинк	79	0,03	0,002	0,08	0,16
р. Волга — г. Кимры						
379	Нефтепродукты	89	0,18	0,006	0,8	0,8
	Фенолы	93	0,004	0	0,012	0,02
	Медь	64	0,004	0,007	0,014	0,035
	Цинк	63	0,01	0,001	0,048	0,068

Таблица 1
(*Окончание*)

р. Волга — г. Ярославль						
930	Нефтепродукты	140	0,43	0,03	2,24	7,78
	Фенолы	128	0,006	0	0,026	0,038
	Медь	31	0,009	0,001	0,022	0,024
	Цинк	37	0,02	0,01	0,08	0,1
р. Волга — г. Нижний Новгород						
1390	Нефтепродукты	335	0,44	0,03	2,19	9,0
	Фенолы	336	0,003	0	0,02	0,09
	Медь	221	0,003	0	0,01	0,186
	Азот аммонийный	356	0,64	0,15	4,2	27,08
	Азот нитритный	375	0,02	0	0,18	2,12
р. Волга — г. Самара						
7310	Нефтепродукты	593	0,12	0,005	0,85	5,0
	Фенолы	467	0,003	0	0,017	0,04
	Медь	181	0,007	0,002	0,03	0,058
	Азот нитритный	559	0,02	0,001	0,14	0,53
р. Волга — г. Саратов						
7340	Нефтепродукты	195	0,16	0,003	0,23	0,45
	Фенолы	198	0,002	0	0,006	0,009
	Медь	197	0,004	0,002	0,01	0,03
	СПАВ	152	0,1	0,06	0,14	0,24
р. Волга — г. Волгоград						
7320	Нефтепродукты	101	0,09	0,009	0,23	0,37
	Фенолы	101	0,001	0	0,005	0,08
	Медь	98	0,003	0,001	0,01	0,04
	СПАВ	92	0,1	0,04	0,15	0,24
	Азот нитритный	59	0,02	0,003	0,16	0,52
р. Волга — г. Астрахань						
19400	Нефтепродукты	771	0,22	0,003	0,96	2,62
	Фенолы	746	0,002	0	0,011	0,034
	Медь	629	0,013	0,002	0,0114	0,41
	Цинк	549	0,01	0,001	0,04	0,18
	Сумма ионов	73	259	178	351	470

В табл. 2 приведены данные лаборатории токсикологии ГОСНИОРХ (О. А. Лященко) по загрязнению акватории Невской губы Финского залива в черте г. Санкт-Петербурга. Как видно из данных, приведенных в этой таблице, загрязненность воды восточной части Финского залива нефтепродуктами повсеместно превышает нормативный показатель предельно-допустимой концентрации (ПДК).

Таблица 2

Загрязненность по содержанию нефтепродуктов (мг/л) и донных отложений (мг/кг)

Среда	Невская губа	Лужская губа	Копорская губа	Открытая акватория	Норматив
Вода	$\underline{0{,}063 \pm 0{,}004}$ 0,01 – 0,30 *n* — 108	$\underline{0{,}101 \pm 0{,}015}$ 0,05 – 0,31 *n* — 18	$\underline{0{,}08 \pm 0{,}01}$ 0,05 – 0,12 *n* — 6	$\underline{0{,}075 \pm 0{,}024}$ 0,04 – 0,14 *n* — 41	ПДК = 0,05
Донные отложения	$\underline{192{,}0 \pm 42{,}0}$ 3,6 – 383,22 *n* — 107	$\underline{91{,}2 \pm 27{,}8}$ 44,0 – 420,0 *n* — 13	$\underline{114{,}0 \pm 45{,}6}$ 56,0 – 340,0 *n* — 6	$\underline{270{,}6 \pm 36{,}9}$ 270,5 – 880,0 *n* — 53	Региональный: для СПб для стандартных ДО = 180

Примечание. В числителе приведены средние значения с ошибкой, в знаменателе указаны пределы изменения, *n* — количество проб.

Выполненная Евросоюзом в 2014 г. ревизия загрязнений в поверхностных водах показала их наличие до 10 000, из которых 432 — вещества, оказывающие отрицательное воздействие на эндокринную систему человека. Эти вещества запрещены санитарными нормами Евросоюза. Наблюдается также негативное влияние водного фактора на формирование здоровья человека [5]. Отмечается необходимость прекращения хлорирования в целях обеззараживания сточных вод, сбрасываемых в реки [6], сокращения поступления в водоемы азотосодержащих соединений, которые превращаются в организме человека в канцерогенные *n*-нитрозамины [7]. В работах [8]–[12] также отмечается повсеместное ухудшение качества воды рек из-за антропогенного загрязнения. Применяемые в настоящее время в технологиях очистки вод химические хлорсодержащие реагенты дают комплекс вторичных более опасных канцерогенных, токсичных хлорорганических веществ. К ним, например, относится бутилхлорид (ПДК = = 0,004 мг/л). Очистка воды от бензина (ПДК = 0,1 мг/л) при отсутствии хлора была бы проще. Вынужденное насыщение хлором воды, текущей в изношенных водопроводных сетях городов, приводит к возникновению хлорорганических соединений, которые более опасны, чем хлор и органические соединения в отдельности. Например, хлорированные дифенолы, одним из которых является диоксин (ПДК = 0,00002 мг/л), и хлорфенолы не задерживаются системами физико-химической и биологической очистки. Аналогичное положение происходит с гипохлоритом натрия (NaOCl). Известно, что переход на гипохлорит натрия увеличивает образование тригалометанов, так как процесс их образования происходит в течение нескольких десятков часов (водородный показатель воды оказывается выше, чем при использовании молекулярного хлора).

За последние 20 лет за счет мутаций устойчивость патогенной микрофлоры к хлору и ультрафиолету повысилась в пять раз. Достаточно отметить, что в США плотность ультрафиолетового потока для обеззараживания питьевой воды увеличена до 110 мДж/см^2, вместо 20 мДж/см^2, установленной санитарными нормами. Поэтому неслучайным является повышенный интерес исследователей к безреагентным (физическим) методам обеззараживания сточных вод. Широкое внедрение дорогого ультрафиолетового обеззараживания воды показывает высокую эффективность этих методов. Наиболее эффективной является очистка загрязненных вод кавитацией. В [13] показана экономическая предпочтительность кавитационных технологий по интегральному параметру затрат при внедрении метода (кавитация — 162, ультрафиолет — 261, хлорирование — 482, озонирование — 1600). Важной особенностью кавитационного воздействия является разложение молекулы воды на кислород и водород. Кислород обладает высокой растворимостью в воде, парамагнитностью и может стабилизировать структуру воды.

Проведенные на животных эксперименты по исследованию содержания рибофлавина (витамина В2) в моче показали, что его поглощение при употреблении жидкокристаллической воды на 500 % выше, чем при употреблении с обычной дистиллированной водой. Структурирование воды влияет также на процесс активации энзимов. Усиление разделения зарядов в активированной воде приводит к возникновению вокруг этих ферментов более высокоэнергетической оболочки, состоящей из структурированной воды, при этом обмен веществ в организме ускоряется. Таким образом, необходимо облегчить работу организма по изменению структуры воды и сохранению определенного запаса энергии для использования в других целях, необходимых для жизнедеятельности человека. Возможность стабилизации воды, существования структурированных комплексов и относительная их устойчивость подтверждены в работах [14], [15].

Малые концентрации кислорода способны стабилизировать локальную структуру водного раствора, что может быть использовано для улучшения качества питьевой воды и эффективной очистки сточной воды. Молекулам кислорода легче внедряться в полости льдоподобной структуры воды, чем образовывать растворы замещения в разупорядоченной структуре. Представляется, что равновесие в растворе с малыми добавками O_2 сдвигается в сторону термоди-

намически более выгодной льдоподобной структуры, в результате происходит стабилизация водного раствора, что позволило предложить новый метод для изменения физико-химических свойств воды [16]. В последнее время интенсивно исследуются кавитационные технологии рассмотренные, например, в работах [17]–[19]. Кавитация — это комплекс различных воздействий, заложенных в основу эффективных наукоемких технологий. Широкий спектр физико-химических воздействий при кавитационной обработке воды придает этому методу универсальный характер [20].

Очевидно, что в разных кавитационных полях (у твердой стенки или в объеме жидкости, фокусируемых вихревыми ультразвуковыми генераторами кавитации, сферическими концентраторами, в объеме кипящей жидкости или в гидродинамическом потоке) характер окислительно-восстановительных реакций, физико-химических процессов, выход продуктов реакций в результате распада молекул воды и участия примесей будет различен. Достаточно привести два примера. Эффекты кавитации (например, ультразвуковой при частоте 22 кГц) или в поле пульсирующего (14 – 80 Гц) большого деформированного пузыря (без потери и с потерей сферической симметрии) различны. Возбуждение и ионизация молекул могут осуществляться либо в результате электронного удара (электрические теории эффектов при кавитации), либо в результате ударов первого рода Франка – Герца (тепловые теории). Иные эффекты кавитации наблюдаются при обработке на частотах 8 кГц, в частности происходит интенсивное разрушение металлических модельных образцов при отсутствии сонолюминесценции [1].

Методы и материалы (Methods and Materials)

При проведении экспериментов были использованы следующие методы и материалы:

1. Термодинамический с использованием изометрического калориметра погруженного типа.

2. Исследования спин-решеточного времени релаксации $T1$ методом ядерного магнитного резонанса.

3. Дифференциально-термический анализ на дериватографе «Паулик».

4. Стандартные методы физико-химического анализа воды и др.

5. Дистиллированная вода однократной и двукратной дистилляции, ионообменные фильтры, портландцемент М400 удельной массой 3,03 г/см^3.

6. Кавитационная обработка воды, осуществляемая в кварцевой термостатированной посуде, которая подробно изложена в работе [1].

Результаты (Results)

Общая схема химических превращений (рис. 1) должна состоять из четырех основных этапов, которые проходят несколько стадий с числом промежуточных и устойчивых соединений от десятков до нескольких десятков тысяч. С учетом энергии взаимодействия и количества растворенных газов при обработке дистиллированной воды ультразвуком при частоте 22 кГц выход конечных продуктов следующий: исходные вещества в других концентрациях, перекись водорода, окислы азота, амины, формальдегид. При низких частотах ультразвука (например, 8 кГц) кавитационные пузырьки имеют большие размеры, чем при частоте 22 кГц с большим гидродинамическим кавитационным воздействием и меньшим химическим выходом.

На рис. 2 приведена кинетика основных химических веществ, инициируемых ультразвуковой кавитационной обработкой воды с равновесным газосодержанием при данных температуре и давлении: возникает колебательная окислительно-восстановительная система, в которой при общей дегазации водного раствора содержания кислорода растет, возникает перекись водорода (следует отметить, что даже бидистиллированная вода содержит поверхностно-активные вещества, что необходимо учитывать при очистке вод [23]).

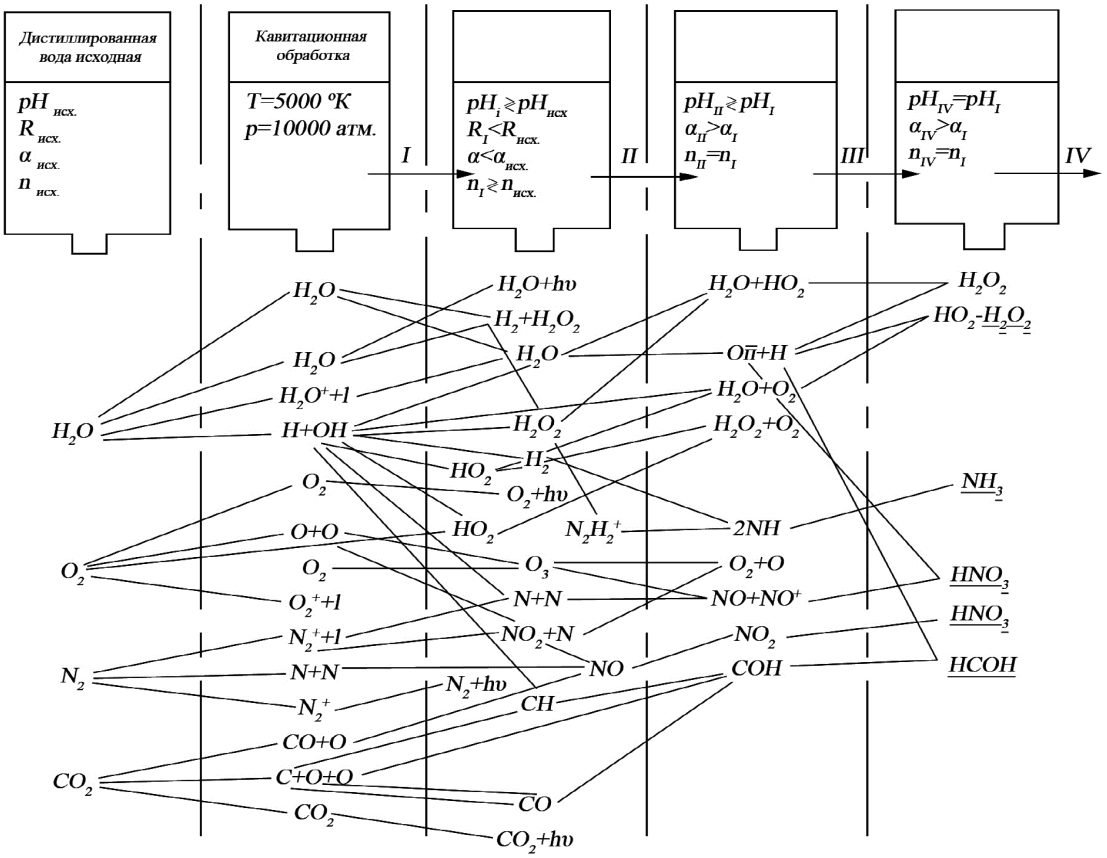


Рис. 1. Схема химических превращений в воде под действием кавитации

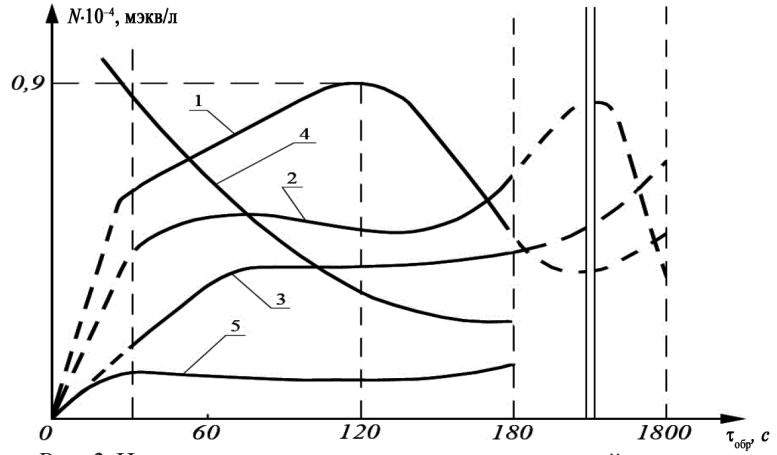


Рис. 2. Изменение содержания основных примесей в воде при кавитационной ультразвуковой обработке с разной продолжительностью:
1 — H_2O_2; *2* — HNO_2; *3* — HNO_3; *4* — HCO_3, CO_2, N_2; *5* — O_2

Установлено, что перекись водорода является основой для появления азотной и далее азотистой кислот, количество которых после нескольких часов воздействия ультразвуком имеет несколько максимумов. В работах [21], [22] слабо отражен накопленный опыт по кавитационным технологиям очистки воды. Остается нерешенным главный вопрос о создании износостойкого устройства гидродинамического принципа с использованием ультразвуковых частот большой производительности без ультразвуковых генераторов.

Рассмотрим причины, удерживающие остаточный кислород в структуре воды. Известно, что молекулам кислорода легче внедряться в полости кластера, чем образовывать растворы замещения в разупорядоченной структуре. Однако приборы, фиксирующие малые изменения структуры воды, являются недостаточно точными. Поэтому для достоверного обнаружения этих изменений можно использовать косвенные методы, позволяющие фиксировать изменения строения воды при взаимодействии ее с веществами.

1. *Термодинамические исследования, позволяющие получить объективные данные.* Дают возможность по снижению ΔH гидратации фиксировать стабилизацию структуры воды, так как при этом облегчается выход молекулы воды из окружения и снижаются затраты энергии на отделения молекул растворителя (тепловой эффект растворения — это сумма эндотермического разрушения кристаллической решетки соли и экзотермического эффекта гидратации ионов молекулами воды). Автором статьи были проведены эксперименты по определению теплоты растворения хлористого калия. По стандартной методике калибровкой растворения хлористого калия получена теплота растворения 4206 ± 10 кал для контрольной дистиллированной воды. Для воды, барботированной кислородом, теплота растворения составляет 4090 ± 15 кал.

2. *Исследование кинетики тепловыделения*. При взаимодействии окиси кальция с водой, барботированной кислородом по сравнению с контрольной, было установлено снижение тепловыделения в первые 3 мин при гидратации окиси кальция с барботированной водой по сравнению с контрольной. Это объясняется тем, что свойства воды в первом случае изменились (стабилизация), что сместило равновесие КА + H_2O = Kag + Aag влево, замедлив процесс образования насыщенного раствора. Это, в свою очередь, привело к снижению электрокинетического потенциала суспензии по сравнению с раствором на контрольной воде затворения. Стабилизация на стадии структурообразования приводит к повышению тепловыделения из-за большей плотности твердеющей системы.

3. *Спектрографические исследования*. ИК-спектры отражения были получены на спектрофотометре «УР-20». Суспензию прокаленного гипса цемента смешивали с барботированной и контрольной водой, наносили на подложку из кварца или флюорита, помещали в приставку отражения. При этом было установлено замедление сроков схватывания для образцов на барботированной воде по сравнению с контрольной.

4. *Метод ядерного магнитного резонанса* (*спиновое эхо*). Данный метод позволяет оценить стабилизацию структуры воды при взаимодействии с цементом. Нами было измерено спин-решеточное время релаксации *T*1 воды затворения цемента, барботированной кислородом и контрольной при прочих равных условиях при водоцементном отношении 0,42. Установлено, что увеличение содержания кислорода в воде затворения ведет к снижению *T*1 в течение всего периода взаимодействия воды с цементом (стабилизация). Добавка в контрольную воду затвора 5 %-го H_2SO_4 привела к увеличению *T*1(дестабилизации).

Обсуждение и заключение (Discussion and Conclusion)

Теоретически и экспериментально обоснованы процессы и явления стабилизации воды кислородом. Кислород получен в результате разложения молекул воды в ультразвуковых кавитационных полях. Стабилизация обеспечивается высокой парамагнитностью кислорода в локальном водном ассоциате, в результате чего меняются физические и химические свойства воды после ее кавитационной обработки и используется как способ управления свойствами воды и различных водных системах. Такая обработка при очистке загрязненных вод не приводит их вторичному загрязнению, характерному для реагентных методов очистки.

Обработка водных растворов при их движении в электромагнитных полях в последнее время проводилась, к сожалению, без детального учета физико-химических изменений в воде, что вызвало негативное отношение к самой идее магнитной обработки. Была обнаружена четкая связь между магнитной обработкой и изменением газосодержания воды (в частности, повышение содержания в ней молекулярного кислорода). При определенных режимах обработки воды (при ее

движении в электромагнитных полях) содержание молекулярного кислорода может повышаться в установленных в работе [24] пределах. Структура воды является в настоящее время характеристикой неопределенной и допускает любые геометрические толкования. Наличие у воды «информационной памяти» убедительного экспериментального подтверждения не получило, поэтому требуется продолжить исследования в этом направлении.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Зубрилов С. П.* Физико-химические свойства воды и прикладные аспекты гидродинамической кавитации / С. П. Зубрилов. — СПб.: СПГУВК, 2010. — 120 с.

2. *Зубрилов С. П.* Микрозагрязнители в питьевой воде городов. Безреагентная очистка воды / С. П. Зубрилов. — СПб.: ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова, 2018. — 154 с.

3. *Баренбойм Г. М.* Загрязнение природных вод лекарствами / Г. М. Баренбойм, М. А. Чиганова. — М.: Наука, 2015. — 285 с.

4. *Брызгало В. А.* Изменчивость экологического состояния речных зон устьевых экосистем крупных рек России / В. А. Брызгало, А. М. Никаноров, О. С. Решетняк // Вода: химия и экология. — 2013. — № 12 (65). — С. 15–21.

5. *Эльпинер Л. И.* Влияние водного фактора на формирование здоровья человека / Л. И. Эльпинер // Вода: химия и экология. — 2009. — № 3 (9). — С. 6–10.

6. *Данилов-Данильян В. И.* Оценка биологической опасности органических ксенобиотиков в источниках водоснабжения / В. И. Данилов-Данильян, В. В. Поройков, М. А. Чиганова, М. Н. Козлов, Д. А. Филимонов, Г.М. Баренбойм // Водоснабжение и санитарная техника. — 2013. — № 10. — С. 17–25.

7. *Зубрилов С. П.* Комплексное использование водных объектов / С. П. Зубрилов, И. О. Потапов, А. В. Яковлев. — СПб.: ГУМРФ им. адм. С. О. Макарова, 2017. — 136 с.

8. *Черников Н. А.* Еще раз о законодательной базе в области водоснабжения и водоотведения / Н. А. Черников, П. П. Бегунов, К. М. Дюба // Вода и экология: проблемы и решения. — 2012. — № 2–3 (50–51). — С. 6–13.

9. Итоги и перспективы научных исследований по проблеме экологии человека и гигиены окружающей среды: монография / под ред. Ю. А. Рахманина. — М.: РГБ, 2008. — 402 с.

10. Водоснабжение Санкт-Петербурга / под ред. Ф. В. Кармазинова. — СПб.: Новый журнал, 2003.

11. Pharmaceuticals in drinking-water. — World Health Organization, 2012. — 52 p.

12. *Кондратьев К. Я.* Перспективы развития цивилизации (многомерный анализ) / К. Я. Кондратьев, В. Ф. Крапивин, В. П. Савиных. — М.: «Лотос», 2003. —712 с.

13. *Шиян Л. Н.* Химия воды и водоподготовка: учеб. пособие / Л. Н. Шиян. — Томск: Изд-во ТПУ, 2004. — 72 с.

14. *Калиньш К. К.* Активация питьевой воды / К. К. Калиньш, Г. А. Фокин. — СПб.: Изд-во ИВС РАН, Тран. Газ, 2012. — 310с.

15. *Смирнов А. Н.* Структура воды: новые экспериментальные данные / А. Н. Смирнов // Наука и технологии в промышленности. — 2010. — № 4. — С 41–45.

16. Пат. 2078048 Российская Федерация, МПК C02F 1/28, C02F 1/36. Способ глубокой очистки жидкости от нефтепродуктов / С. П. Зубрилов, А. С. Зубрилов; заяв. и патентообл. С. П. Зубрилов, А. С. Зубрилов. — № 94 94037453; заявл. 28.09.1994; опубл. 1997.

17. *Кулагин В. А.* Методы и средства технологической обработки многокомпонентных сред с использованием эффектов кавитации: дис. ... д-ра техн. наук: 01.04.14, 01.02.05 / В. А. Кулагин. — Красноярск, 2004. — 406 с.

18. *Криволуцкий А. С.* Повышение эффективности работы тепловых сетей за счет кавитационной обработки воды: дис. ... канд. техн. наук / А. С. Криволуцкий. — Красноярск: СФУ, 2007. — 215 с.

19. *Евстигнеев В. В.* Совершенствование технологии кондиционирования сточных вод энергетических систем и комплексов: дис. … канд. техн. наук / В. В. Евстигнеев. — Красноярск: СФУ, 2012. — 123 с.

20. *Зубрилов С. П.* Микрозагрязнители в питьевой воде городов / С. П. Зубрилов // Проектирование, строительство и эксплуатация гидротехнических сооружений водных путей: сборник материалов конференции; под ред. Г. Л. Гладкова, К. П. Моргунова. — СПб.: ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова», 2017. — С. 25–38.

21. *Багров В. В.* Возможность интенсификации окислительно-восстановительных процессов при очистке воды за счет использования эффекта кавитации / В. В. Багров, Д. Ю. Графов, А. В. Десятов, Н. Е. Кручинина, К. А. Кутербеков, Т. Н. Нурахметов, Р. В. Якушин // Вода: химия и экология. — 2013. — № 12 (65). — С. 35–37.

22. *Батоева А. А.* Перспективы применения низконапорной гидродинамической кавитации в процессах очистки сточных вод / А. А. Батоева, Д. Г. Асеев, М. Р. Сизых, М. С. Хандархаева // Вода: химия и экология. — 2011. — № 9 (39). — С. 27–31.

23. *Сиротюк М.Г.* Акустическая кавитация / М. Г. Сиротюк. — Наука, 2008. — 271 с.

24. *Зубрилов С. П.* Питьевая вода городов. Технологии очистки вод: монография / С. П. Зубрилов. — СПб.: Изд-во ГУМРФ им. адм. С. О. Макарова, 2015. — 154 с.

REFERENCES

1. Zubrilov, S. P. *Fiziko-khimicheskie svoistva vody i prikladnye aspekty gidrodinamicheskoi kavitatsii*. SPb.: SPGUVK, 2010.

2. Zubrilov, S. P. *Mikrozagryazniteli v pit'evoi vode gorodov. Bezreagentnaya ochistka vody*. SPb.: GUMRF imeni admirala S. O. Makarova, 2018.

3. Barenboim, G. M., and M. A. Chiganova. *Zagryaznenie prirodnykh vod lekarstvami*. M.: Nauka, 2015.

4. Bryzgalo, V. A., A. M. Nikanorov, and O. S. Reshetnyak. "Kecological state variability of mouth ecosystems of big rivers of Russia." *Water: chemistry and ecology* 12(65) (2013): 15–21.

5. Elpiner, L.I. "Effect of water factor on human health status." *Water: chemistry and ecology* 3(9) (2009): 6–10.

6. Danilov-Danil'ian, Viktor Ivanovich, Vladimir Vasil'evich Poroikov, Mariia Alekseevna Chiganova, Mikhail Nikolaevich Kozlov, Dmitrii Alekseevich Filimonov, and Grigorii Matveevich Barenboim. "Estimation of biological hazard of organic xenobiotics in water supply sources." *Water Supply and Sanitary Technique* 10 (2013): 17–25.

7. Zubrilov, S. P., I. O. Potapov, and A.V. Yakovlev. *Kompleksnoe ispol'zovanie vodnykh ob"ektov*. SPb.: GUMRF im. adm. S. O. Makarova, 2017.

8. Chernikov, N. A., P. P. Begunov, and K.M. Dyuba. "Eshche raz o zakonodatel'noi baze v oblasti vodosnabzheniya i vodootvedeniya." *Voda i ekologiya: problemy i resheniya* 2-3(50-51) (2012): 6–13.

9. Rakhmanina, Yu. A., eds. *Itogi i perspektivy nauchnykh issledovanii po probleme ekologii cheloveka i gigieny okruzhayushchei sredy: monografiya*. M.: RGB, 2008.

10. Karmazinov, F. V. *Vodosnabzhenie Sankt-Peterburga*. SPb.: Novyi zhurnal, 2003.

11. *Pharmaceuticals in drinking-water*. World Health Organization, 2012.

12. Kondrat'ev, K. Ya., V. F. Krapivin, and V. P. Savinykh. *Perspektivy razvitiya tsivilizatsii (mnogomernyi analiz)*. M.: «Lotos», 2003.

13. Shiyan, L. N. *Khimiya vody i vodopodgotovka: ucheb. posobie*. Tomsk: Izd-vo TPU, 2004.

14. Kalnin'sh, K. K., and G. A. Fokin. *Aktivatsiya pit'evoi vody*. SPb.: Izd-vo IVS RAN, Tran. Gaz, 2012.

15. Smirnov, A. N. "Struktura vody: novye eksperimental'nye dannye." *Nauka i tekhnologii v promyshlennosti* 4 (2010): 41–45.

16. Zubrilov, S. P., and A. S. Zubrilov. RU 2 078 048 C1, IPC C 02F 1/28, C 02F 1/36. Sposob glubokoi ochistki zhidkosti ot nefteproduktov. Russian Federation, assignee. Publ. 1997.

17. Kulagin, V. A. Metody i sredstva tekhnologicheskoi obrabotki mnogokomponentnykh sred s ispol'zovaniem effektov kavitatsii. Dr. diss. Krasnoyarsk, 2004.

18. Krivolutskii, A. S. Povyshenie effektivnosti raboty teplovykh setei za schet kavitatsionnoi obrabotki vody. PhD diss. Krasnoyarsk. SFU 2007.

19. Evstigneev, V. V. Sovershenstvovanie tekhnologii konditsionirovaniya stochnykh vod energeticheskikh sistem i kompleksov. PhD diss. Krasnoyarsk: SFU, 2012.

20. Zubrilov, S. P. "Mikrozagryazniteli v pit'evoi vode gorodov." *Proektirovanie, stroitel'stvo i ekspluatatsiya gidrotekhnicheskikh sooruzhenii vodnykh putei: Sbornik materialov konferentsii*. Edited by G.L. Gladkov, K. P. Morgunov. SPb.: FGBOU VO «GUMRF imeni admirala S.O. Makarova», 2017. 25–38.

21. Bagrov, V. V., D. Yu. Grafov, A. V. Desyatov, N.E. Kruchinina, K. A. Kuterbekov, T.N. Nurachmetov, and R.V. Yakushin. "Possibility of intensification of oxidation-reduction processes during water treatment using cavitation." *Water: chemistry and ecology* 12(65) (2013): 35–37.

22. Batoeva, Agniya A., Denis G. Aseev, Marina R. Sizikh, and Marina S. Handarhaeva. "Low-pressure hydrodynamic cavitation in the process of waste water treatment." *Water: chemistry and ecology* 9(39) (2011): 27–31.

23. Sirotyuk, M. G. *Akusticheskaya kavitatsiya*. Nauka, 2008.

24. Zubrilov, S. P. *Pit'evaya voda gorodov. Tekhnologii ochistki vod: monografiya*. SPb.: Izd-vo GUMRF im. adm. S. O. Makarova, 2015.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Зубрилов Сергей Павлович —
доктор технических наук, профессор
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала С.О. Макарова»
198035, Россия, г. Санкт-Петербург, ул. Двинская, 5/7
e-mail: *zubrilovsergei@yandex.ru*, *kaf_ovrb@gumrf.ru*

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Zubrilov, Sergey P. —
Dr. of Technical Sciences, professor
Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping
5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg 198035, Russian Federation
e-mail: *zubrilovsergei@yandex.ru*, *kaf_ovrb@gumrf.ru*

Статья поступила в редакцию 17 мая 2018 г.
Received: May 17, 2018.

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

СУДОВЫЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ УСТАНОВКИ, СИСТЕМЫ И УСТРОЙСТВА

DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-6-1244-1254

SIX STORKE ENGINES: OPERATING PROCEDURE AND SCHEMES OF CRANKSHAFTS

V. A. Zhukov[1], A. I. Yamanin[2], O. V. Melnik[1]

[1] — Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping, St. Petersburg, Russian Federation
[2] —Yaroslavl State Technical University, Yaroslavl, Russian Federation

The article is devoted to the perspective direction of development of internal combustion piston engines – realization of six-stroke working processes. The article presents an overview of possible options for the implementation of six-stroke cycles, known types of engines. The greatest interest is the six-stroke cycle with two working strokes of the piston, one of which is carried out under the pressure of the combustion products of fuel, and the second – under the pressure of steam formed as a result of water supply to the cylinder. This cycle is implemented in the Crower engine It is shown that the six-stroke cycle has a number of advantages over the four-stroke cycle: its implementation improves the economic and environmental performance of the engine, reduces the temperature level of parts, which has a positive effect on resource performance. On the basis of published indicator diagrams of six-stroke engines, diagrams of the total torques of four-cylinder engines operating on four-stroke and six-stroke cycles are constructed. It was found that the implementation of a six-stroke working cycle with additional injection of water into the cylinder leads to some deterioration of the uniformity of the alternation of the working strokes and the uniformity of the torque. The use of special schemes of crankshafts can contribute to some improvement in these indicators. Recommendations on the use of crankshafts with cross-shaped schemes in six-stroke engines are given The presented research technique can be used to select the preferred design of crankshafts for engines with different number of cylinders. Given the need for the preparation and storage of distilled water in the implementation of the six-stroke cycle, the conclusion is made about the possibility of using six-stroke engines as part of marine power plants. The necessity of further research of kinematics, dynamics and vibration activity of six-stroke engines is pointed out.

Keywords: six-stroke engine, economic and environmental indicators, the order of working strokes, the uniformity of angular velocity and torque, the scheme of crankshafts.

For citation:
Zhukov, Vladimir A., Alexander I. Yamanin, and Olesya V. Melnik. “Six storke engines: operating procedure and schemes of crankshafts.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 10.6 (2018): 1244–1254. DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-6-1244-1254.

УДК 621.432

ДВИГАТЕЛИ С ШЕСТИТАКТНЫМ РАБОЧИМ ЦИКЛОМ: ПОРЯДОК РАБОТЫ И СХЕМЫ КОЛЕНЧАТЫХ ВАЛОВ

В. А. Жуков[1], А. И. Яманин[2], О. В. Мельник[1]

[1] — ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова», Санкт-Петербург, Российская Федерация
[2] — ФГБОУ ВО «Ярославский государственный технический университет», Ярославль, Российская Федерация

Статья посвящена перспективному направлению развития поршневых двигателей внутреннего сгорания — реализации шеститактных рабочих процессов. В статье представлен обзор возможных вариантов осуществления шеститактных циклов известных типов двигателей. Наибольший интерес представляет шеститактный цикл с двумя рабочими ходами поршня, один из которых осуществля-

ется под действием давления продуктов сгорания топлива, а второй — под действием давления пара, образующегося в результате подачи воды в цилиндр. Такой цикл реализуется в двигателе Кроуэра. Показано, что шеститактный цикл имеет ряд преимуществ перед четырехтактным: при его реализации улучшаются экономические и экологические показатели работы двигателя, снижается температурный уровень деталей, что положительно сказывается на ресурсных показателях. На основании опубликованных индикаторных диаграмм шеститактных двигателей построены диаграммы суммарных крутящих моментов четырехцилиндровых двигателей, работающих по четырехтактному и шеститактному циклам. При этом выявлено, что реализация шеститактного рабочего цикла при дополнительном впрыске воды в цилиндр приводит к некоторому ухудшению равномерности чередования рабочих ходов и равномерности крутящего момента. Применение особых схем коленчатых валов может способствовать улучшению этих показателей. Даны рекомендации по использованию в шеститактных двигателях коленчатых валов, имеющих крестообразные схемы. Представленная методика исследований может быть использована для выбора предпочтительной конструкции коленчатых валов для двигателей с различным числом цилиндров. Учитывая необходимость подготовки и хранения дистиллированной воды при реализации шеститактного цикла, можно сделать вывод о возможности использования шеститактных двигателей в составе судовых энергетических установок. Указано на необходимость продолжения исследования кинематики, динамики и виброактивности шеститактных двигателей.

Ключевые слова: шеститактный двигатель, экономические и экологические показатели, порядок рабочих ходов, равномерность угловой скорости и крутящего момента, схемы коленчатых валов.

Для цитирования:

Жуков В. А. Двигатели с шеститактным рабочим циклом: порядок работы и схемы коленчатых валов / В. А. Жуков, А. И. Яманин, О. В. Мельник // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2018. — Т. 10. — № 6. — С. 1244–1254. DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-6-1244-1254.

Введение (Introduction)

Основной целью совершенствования двигателей внутреннего сгорания является улучшение экономических и экологических показателей при обеспечении требуемого уровня надежности. Для оценки возможности повышения эффективности тепловых двигателей используются энергетические и эксергетические методы [1]. Одним из известных способов улучшения эффективных показателей поршневых двигателей является реализация рабочего процесса с дополнительным впрыском воды в цилиндр. Это может осуществляться в течение традиционного четырехтактного цикла вместе с основным топливом для улучшения многих (прежде всего, мощностных) показателей двигателя. Такой способ работы в 1940–1950 гг. применялся на авиационных поршневых двигателях, выпускавшихся серийно фирмами *BMW*, *Deimler-Benz*, *Pratt&Whitney* и некоторыми другими предприятиями [2]. Положительный эффект от впрыскивания воды в цилиндры современных судовых двигателей описан в источнике [3]: показано, что для среднеоборотного дизеля Wärtsilä L46/58 (6ЧРН 46/58) потенциально возможно увеличение индикаторного КПД до 0,55 и среднего индикаторного давления до 2,75 МПа, а также снижение индикаторного расхода топлива до 0,154 кг/(кВт·ч).

Один из первых патентов, в которых описан шеститактный двигатель, был получен L. H. Dyer в 1920 г. (см. пат. США № 1339176); в России заявки на патент «О двигателе внутреннего горения с вбрызгиванием нагретой воды и с конденсацией» были поданы в 1916 и 1923 гг. (см. пат. 2308, кл. 46а^6, 3). Следует также отметить, что в книге американского автора Glenn D. Angle «Airplane Engine Encyclopedia» (Otterbein Press, Дейтон (Dayton), Огайо (Ohio), 1921, с. 437) историком авиации Ф. Джарреттом была дана следующая информация: «Двигатель компании *Ruston Proctor* является экспериментальным мотором воздушного охлаждения ротативного типа, который работает по шеститактному циклу и развивает мощность в 200 л. с.» (рис. 1). Во втором издании этой книги «Aerosphere, 1939» (Aircraft Publications, New York City, 1940) отмечалось, что дополнительная информация об этом двигателе отсутствует.

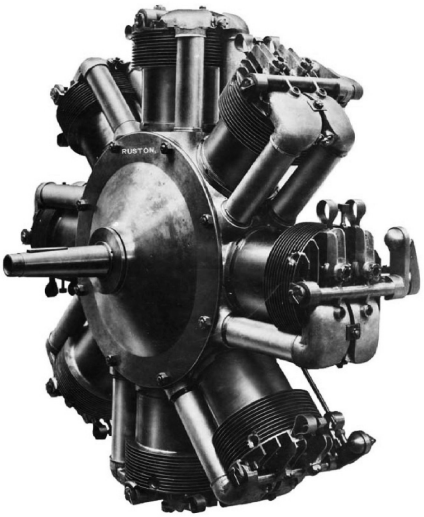


Рис. 1. Ruston Proctor: 300 л. с., шесть тактов
(фотография из справочника Aero Engine, выпущенного в 1918 г.)

В работе [4] приведен обзор известных шеститактных двигателей, которые разделены на две группы.

1-я группа. *Двигатели с двумя рабочими ходами в течение одного цикла, причем один рабочий ход совершается поршнем под действием продуктов сгорания, а второй — под действием пара или воздуха*. К таким двигателям относятся:

– двигатель Гриффина (Griffin Six Stroke Engine — *Griffin Simplex*), изобретенный в 1883 г. и производившийся под маркой «Килмарнок» (Kilmarnock);

– двигатель Баюласа (Bajulaz Six Stroke Engine), патент на который был получен в 1985 г., а в 1989 г. была создана усовершенствованная модель двигателя [5], [6];

– двигатель Кроуэра (Crower Six Stroke Engine), созданный в 2004 г.;

– двигатель Велозета (Velozeta Six Stroke Engine), особенностью которого является то, что для осуществления дополнительного рабочего хода используется воздух [7];

– двигатель Нийкадо (NIYKADO Six Stroke Engine), который создал Чанаил Клитас Анил (Chanayail Cleetus Anil) из Индии в период 2004–2012 гг., когда двигатель был запатентован.

2-я группа. *Двигатели, в которых в одном цилиндре расположены два поршня, движущихся навстречу друг другу.* Один из поршней движется с частотой, в два раза меньшей частоты другого поршня. Основной функцией второго поршня является замена клапанного механизма обычного четырехтактного двигателя. Таким образом, в течение каждого цикла осуществляется шесть ходов поршней. Использование второго поршня позволяет также увеличить степень сжатия. К таким двигателям относятся:

– двигатель Бир Хэд (Beare Head Six Stroke), изобретенный австралийцем М. Биром (M. Beare);

– двигатель с зарядным насосом (Charge Pump Engine), изобретенный Х. Котманном (H. Kottmann).

Существует и другой способ организации шеститактного рабочего процесса [8]: по окончании трех традиционных тактов (отличие заключается в том, что при этом процесс протекает при повышенных значениях избытка воздуха) производится сжатие отработавших газов (четвертый такт). Далее происходят впрыскивание топлива, сгорание, расширение (пятый такт) и традиционный выпуск отработавших газов (шестой такт). В источнике [8] рекомендованы значения соотношений «воздух – топливо» для первого и второго процессов сгорания, а также приведена индикаторная диаграмма, аналогичная приведенной в [9]. Термодинамика такого процесса описана А. Н. Соболенко [10]. Сходный с последним рабочий цикл описан А. Ф. Косяком в документе [11], где предусмотрена работа рядного четырехцилиндрового двигателя с рециркуляцией

части отработавших газов в соседние цилиндры, в которых вспышки следуют через 270 град. поворота вала. Дополнительная работа на пятом такте здесь совершается за счет импульса давления, сформированного поршнем соседнего цилиндра.

В настоящее время наибольшую известность получил шеститактный двигатель, изобретенный Б. Кроуэром (B. Crower). В двигателе Кроуэра первоначально реализуются четыре традиционных такта (наполнение, сжатие, расширение и выпуск). В течение выпуска (при движении поршня к верхней мертвой точке) в цилиндр впрыскивается вода, которая превращается в пар, совершающий при расширении (пятый такт) дополнительную работу. Шестым тактом является выпуск отработавшего пара. В связи с этим такие двигатели называют *шеститактными*. Термодинамический цикл шеститактного двигателя представлен на рис. 2.

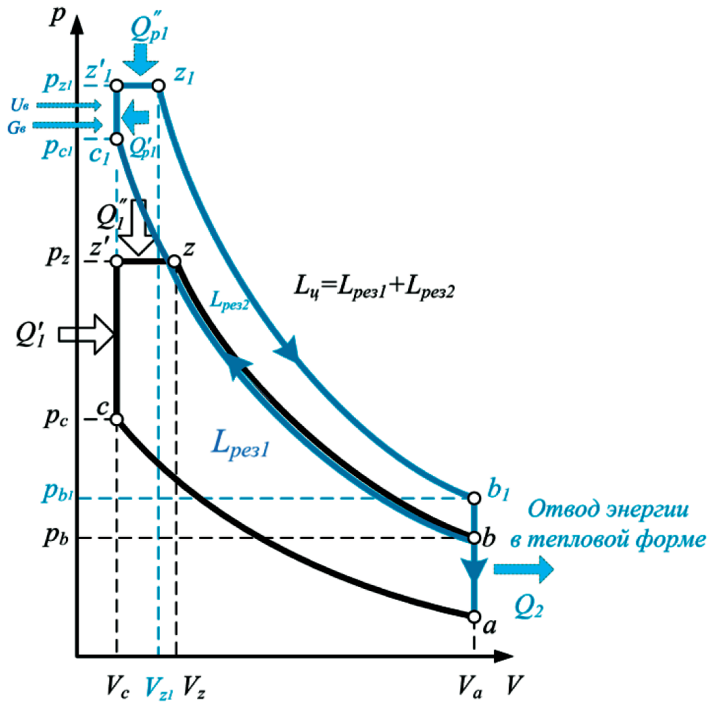


Рис. 2. Термодинамический цикл шеститактного двигателя:
V — объем надпоршневого пространства; V_a — объем в начале сжатия; V_c — объем в конце сжатия; V_z — объем в конце подвода теплоты в газовом цикле; V_{z1} — объем в конце подвода теплоты в паровом цикле; p — давление в цилиндре; p_c — давление в конце сжатия в газовом цикле; p_z — максимальное давление газового цикла; p_{c1} — давление в конце сжатия в паровом цикле; p_{z1} — максимальное давление парового цикла; Q'_1, Q''_1 — теплота, подведенная к рабочему телу в газовом цикле, соответственно, в изохорном и изобарном процессах; Q'_{p1}, Q''_{p1} — теплота, подведенная к рабочему телу в паровом цикле, соответственно, в изохорном и изобарном процессах; $G_в$, $U_в$ — соответственно масса и внутренняя энергия воды, поданной в цилиндр; $L_{рез1}$, $L_{рез2}$, $L_ц$ — работа, совершенная, соответственно, в газовом цикле, в паровом цикле, в шеститактном цикле

Длительность рабочего цикла составляет 1080 град. поворота коленчатого вала (рис. 3) [9].

Целесообразность реализации шеститактного цикла в современных двигателях наземного и водного транспорта рассматривается в работах [9]–[13], анализ патентно-лицензионной ситуации в области шеститактных двигателей дан А. А. Лефёровым [14]. В работе [15] исследован термодинамический цикл с парогазовым рабочим телом. Показано, что впрыск воды обеспечивает снижение тепловых потерь и температурных напряжений в деталях цилиндропоршневой группы и позволяет отказаться от дорогостоящих конструкционных материалов. Перспективность использования шеститактных двигателей подтверждается возможностью использования не только дизельного топлива и бензина, но и альтернативных видов топлива: водорода [16], [17] и водородно-кислородной смеси, состоящей из 2/3 водорода

и 1/3 кислорода [18], [19]. Использование альтернативных видов топлива и снижение максимальной температуры цикла в шеститактных двигателях обеспечивает существенное снижение выбросов с отработавшими газами: C_nH_m, CO, CO_2, SO_x, NO_x и твердых частиц. Внутреннее охлаждение в шеститактном цикле позволяет на 30−50 % увеличить степень сжатия: до 14–16 для бензиновых двигателей и до 25–35 для дизелей, что обеспечивает повышение эффективных показателей работы двигателей. В четырехтактных двигателях отношение количества рабочих тактов к их общему числу составляет 1 : 4, а в шеститактных двигателях Кроуэра — 1 : 3. За счет такого изменения обеспечивается 30 % дополнительной полезной работы без увеличения расхода топлива. Таким образом, в работах [20]–[22], посвященных исследованию рабочих процессов шеститактных двигателей, доказана перспективность их использования с экономической и экологической точки зрения, а снижение температурного уровня деталей двигателя обеспечит увеличение их ресурса.

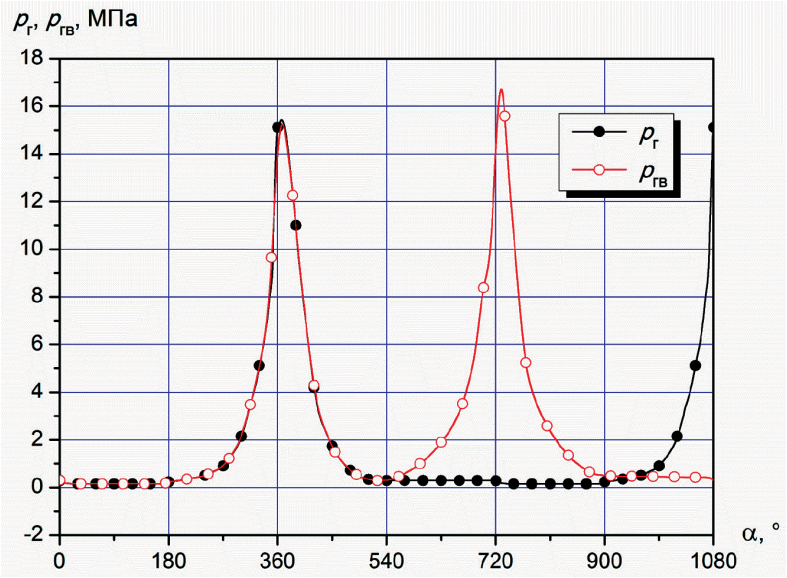


Рис. 3. Индикаторные диаграммы шеститактного ($p_{гв}$) и четырехтактного ($p_г$) циклов

При этом необходимо отметить, что указанная длительность шеститактного рабочего цикла (1080 град.) в многоцилиндровых двигателях с традиционными схемами коленчатых валов приводит к изменению равномерности чередования рабочих ходов и, как следствие, к изменению равномерности крутящего момента и хода. В известных работах на эту тему вопросы кинематики, динамики и виброактивности шеститактных двигателей не рассматривались, тогда как для четырехтактных двигателей, конструкция которых достаточно хорошо проработана, вопросы кинематики и динамики кривошипно-шатунного механизма и виброактивности двигателей продолжают оставаться предметом изучения и анализа [23]–[25]. В связи с этим и было предпринято данное исследование[1], которое следует рассматривать как первичное обсуждение проблемы.

Методы и материалы (Methods and Materials)

Задача о порядках работы двигателя (последовательности чередования тактов в разных цилиндрах) решалась по методике [26] применительно к наиболее распространенным практически во всех видах транспорта схемам двигателей. Рассматривались рядный четырехцилиндровый и *V*-образные шести-, восьми-, десяти- и двенадцатицилиндровый двигатели, работающие по четырех- и шеститактному циклам. Для шеститактных двигателей были использованы оцифрованные индикаторные диаграммы, приведенные в источниках [8], [9]; способ организации шеститактного процесса (впрыск воды или повторное сжатие отработавших газов) здесь неважен. Первоначально

[1] Вопросов, связанных с реализацией шеститактного рабочего процесса, намного больше (в частности, анализ нагрузок на шейки и подшипники коленчатого вала, прочность звеньев КШМ, защита деталей от коррозии и т. д.). Здесь рассмотрены лишь некоторые из них.

предполагалось, что двигатели имеют традиционные для каждого из них схемы коленчатых валов (например, для рядного двигателя — четырехкривошипный плоский, для *V*-образного шестицилиндрового — трехкривошипный пространственный с равномерной заклинкой кривошипов). Значения углов развала цилиндров *V*-образных двигателей приведены в таблице.

Относительные значения степени неравномерности крутящего момента двигателей, работающих по четырех- и шеститактному циклам

$i = 4$			$i = 6$		$i = 8$		$i = 10$		$i = 12$	
$\tau = 4$	$\tau = 6$	$\tau = 6a$	$\tau = 4$	$\tau = 6$	$\tau = 4$	$\tau = 6$	$\tau = 4$	$\tau = 6$	$\tau = 4$	$\tau = 6$
1,0	4,42	3,60	1,00	1,22	1,0	3,84	1,0	1,91	1,0	3,68

Примечания: вариант $\tau = 6a$ соответствует четырехцилиндровому двигателю с крестообразным валом; углы развала цилиндров двигателей с $i = 6$ и $i = 8$ равны 90°; с $i = 10$ и $i = 12$ — соответственно 72° и 60°.

В таблице приведены также значения степени неравномерности крутящего момента двигателей с наиболее распространенными значениями чисел цилиндров при реализации в них четырехтактного ($\tau = 4$) и шеститактного ($\tau = 6$) рабочих циклов. В каждом случае вычисленные значения для четырехтактного двигателя приняты за единицу.

Массовые характеристики звеньев были определены в результате твердотельного моделирования.

Результаты (Results)

Установлено, что в многоцилиндровом шеститактном двигателе изменяется порядок следования рабочих ходов (здесь имеются в виду ходы, соответствующие расширению как продуктов сгорания топлива, так и пара), в некоторые моменты времени в разных цилиндрах эти процессы происходят одновременно (рис. 4 и 5). В связи с этим в шеститактных двигателях увеличивается неравномерность суммарного крутящего момента. Замена плоского коленчатого вала в шеститактном двигателе на крестообразный делает крутящий момент более равномерным.

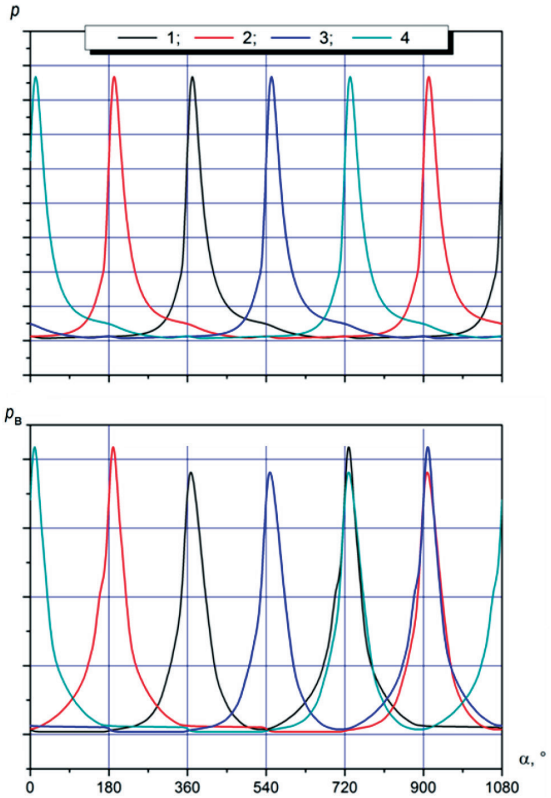


Рис. 4. Индикаторные диаграммы последовательно работающих цилиндров четырехцилиндровых рядных четырехтактного p и шеститактного $p_в$ двигателей с плоским коленчатым валом
Условные обозначения: 1, 2, … , 4 — номера цилиндров

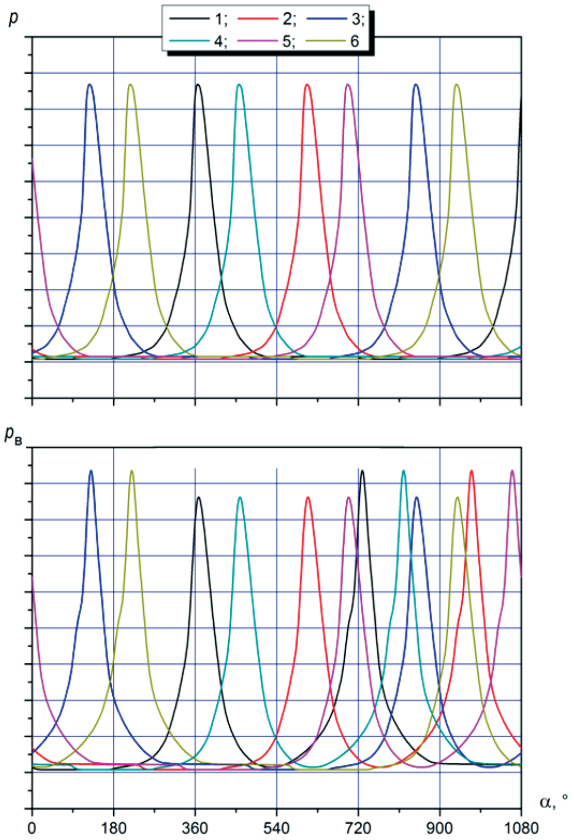


Рис. 5. Индикаторные диаграммы последовательно работающих цилиндров шестицилиндровых *V*-образных четырехтактного p и шеститактного $p_в$ двигателей с трехкривошипным валом
Условные обозначения: *1*, *2*, … , *6* — номера цилиндров

Обсуждение (Discussion)

Изменение неравномерности суммарного крутящего момента в шеститактном двигателе позволяет предположить, что изменение схемы заклинки кривошипов вала может способствовать улучшению равномерности крутящего момента. В связи с этим предпринята попытка расчета суммарного крутящего момента четырехцилиндрового двигателя с крестообразным коленчатым валом [8], применение которого известно в двухтактных двигателях (рис. 6 и 7). При этом в таких двигателях становятся неуравновешенными моменты сил инерции первого порядка, но это устраняется применением уравновешивающего механизма, схема которого также хорошо известна.

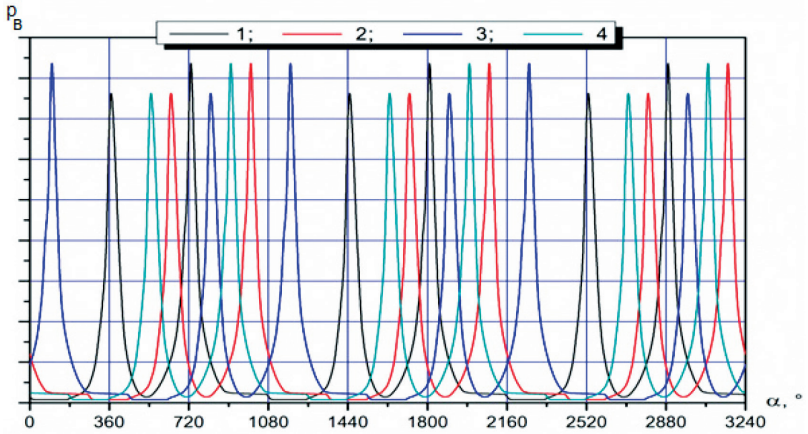


Рис. 6. Индикаторные диаграммы последовательно работающих цилиндров четырехцилиндрового рядного шеститактного двигателя с крестообразным коленчатым валом

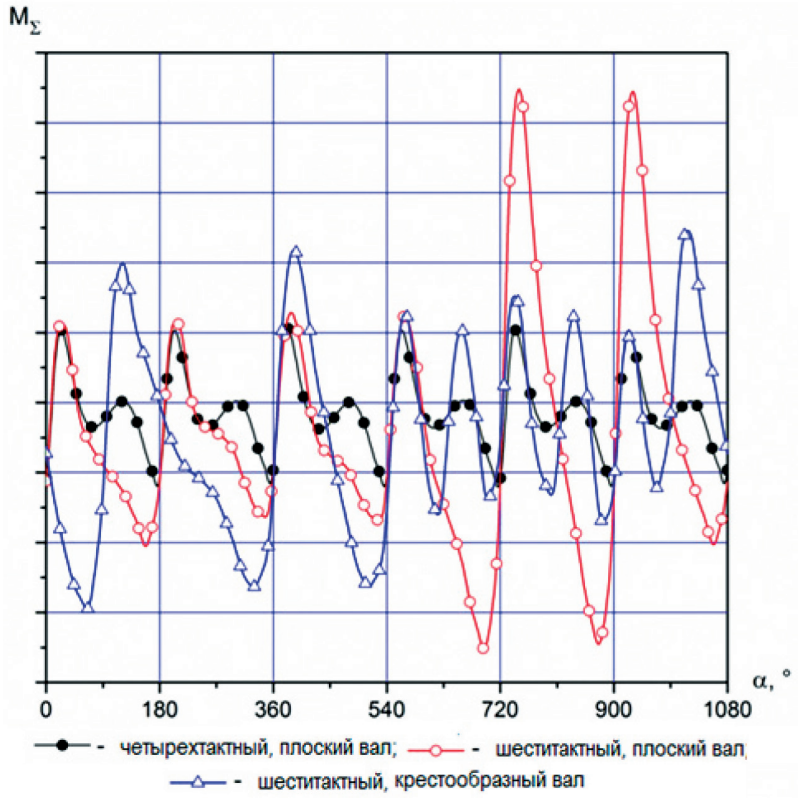


Рис. 7. Изменение суммарного крутящего момента четырехцилиндрового двигателя с плоским валом, работающего по четырех- и шеститактному циклам, и шеститактного с крестообразным валом

При работе двигателя по шеститактному циклу изменяется спектральный состав крутящего момента, развиваемого единичным цилиндром. В связи с этим для расчетов крутильных колебаний следует определять амплитуды его гармонических составляющих с порядками 1/3, 2/3, 3/3, 4/3 и т. д.

Заключение (Conclusion)

Наиболее перспективным следует считать использование шеститактных двигателей в составе судовых энергетических установок. В условиях машинного отделения морских и речных судов можно обеспечить подготовку и хранение дистиллированной воды, необходимой для подачи в цилиндры. При ограниченных объемах моторных отсеков наземных транспортных средств решение этой задачи вызывает значительные трудности.

Реализация в двигателе шеститактного рабочего цикла приводит к некоторому снижению равномерности хода и крутящего момента. Частичное устранение указанных обстоятельств потенциально возможно при использовании коленчатых валов с отличной от традиционных схем заклинки кривошипов, определение которых представляется вполне самостоятельной задачей. Описанная методика позволяет осуществлять выбор предпочтительных схем коленчатых валов для двигателей, реализующих шеститактный цикл при различном числе цилиндров.

Для корректного расчета на прочность деталей шеститактных двигателей необходимо продолжать исследования их кинематических, динамических и вибрационных характеристик.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Ерофеев В. Л.* Энергетический и эксергетический подходы к оценке повышения эффективности тепловых двигателей / В. Л. Ерофеев, В. А. Жуков, А. С. Пряхин // Вестник Государственного универси-

тета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2017. — Т. 9. — № 5. — С. 1017–1026. DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-5-1017-1026.

2. *Кайдаш Н. Ф.* Впрыск воды в авиационные двигатели / Н. Ф. Кайдаш, К. К. Папок, Е. В. Любановский, Ю. П. Блонский. — М.: Ред.-изд. отдел Аэрофлота, 1946. — 96 с.

3. *Белоусов Е. В.* Влияние на рабочий процесс среднеоборотного судового дизеля путем впрыскивания воды в рабочий цилиндр / Е. В. Белоусов, М. С. Агеев, В. Н. Свиридов // Двигатели внутреннего сгорания. — 2010. — № 1. — С. 40–43.

4. *Mohandas G.* Review of Six Stroke Engine and Proposal for Alternative Fuels / G. Mohandas, V. Desai-Patil // SSRG International Journal of Mechanical Engineering (SSRG-IJME). — 2015. — Vol. 2. — Is. 10. — Pp. 19–24.

5. Pat. 4513568 USA, IPC F02B 75/021 Method for the transformation of thermal energy into mechanical energy by means of a combustion engine as well as this new engine / Roger Bajulaz; USA assignee. — № US06442799; app. 18.11.1982; pub. 30.04.1985. — 9 p.

6. Pat. 4809511 USA, IPC F02G 1/02 Internal Combustion Engine / Roger Bajulaz; USA assignee. — № US07059218; app. 08.06.1987; pub. 07.03.1989. — 12 p.

7. *Pande P. H.* Velozeta Six Stroke Engine / P. H. Pande // International Journal of Research in Advent Technology. — 2015. — Special Issue. — Pp. 215–219.

8. Application US 20140157758 A1, IPC F01N 3/2066, F01N 3/103 After-treatment system and method for six-stroke combustion cycle / Ronald Silver Scott, B. Fiveland, D. Ryan Williams; Caterpillar Inc. assignee. App. 12.06.2014. — 13 p.

9. *Быстров О. И.* Повышение экономических и экологических показателей дизеля путем реализации комбинированного шеститактного цикла: автореф. дис. … канд. техн. наук: 05.04.02 / О. И. Быстров. — Челябинск: Южно-Уральский гос. ун-т, 2008. — 16 с.

10. *Соболенко А. Н.* Термодинамический КПД обобщенного теоретического цикла шеститаткного ДВС / А. Н. Соболенко // Вестник Тихоокеанского государственного университета. — 2015. — № 1 (36). — С. 141–150.

11. А. с. SU 1617169 A1, МПК F01B 75/02. Способ работы шеститактного двигателя внутреннего сгорания / А. Ф. Косяк, В. И. Васильев, В. Н. Осипов. — № 4380121/25-06; Заявлено 18.02.88; Опубл. 30.12.90, Бюл. № 48.

12. *Романов С. В.* Повышение топливной экономичности двигателей сельскохозяйственных машинно-тракторных агрегатов путем применения водной инжекции: дис. … канд. техн наук: 05.20.01 / С. В. Романов. — Троицк: Южно-Уральский гос. аграрн. ун-т, 2017. — 207 с.

13. *Karmalkar C.* Analyzing the implementation of six stroke engine in a Hybrid Car / C. Karmalkar, V. Raut // International Journal of Mechanical Engineering and Applications. — 2014. — Vol. 2. — No. 1. — Pp. 1–4. DOI: 10.11648/j.ijmea.20140201.11.

14. *Лефёров А. А.* Актуальность и проблемы совершенствования цикла ДВС применением непосредственного впрыска воды / А. А. Лефёров, Н. Д. Куприянов // Труды МАИ. — 2010. — № 39. — С. 10.

15. *Юша В. Л.* Анализ эффективности идеального термодинамического цикла комбинированного двигателя внутреннего сгорания с парогазовым рабочим телом / В. Л. Юша, Г. И. Чернов // Омский научный вестник. — 2009. — № 3 (83). — С. 154–158.

16. *Prasath B. R.* Hydrogen operated internal combustion engines–a new generation fuel / B. R. Prasath, E. Leelakrishnan, N. Lokesh, H. Suriyan, E. Guru Prakash, K. O. Mustaq Ahmed // International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering. — 2012. — Vol. 2. — Is. 4. — Pp. 52–57.

17. *Deepak Kumar.* Hydrogen Fuel in 6-Stroke IC Engines and Reduction of Noxemission Using Hollow Fiber Membrane Module / Deepak Kumar, N. Gowtham // International Journal of Mechanical and Production Engineering (IJMPE). — 2015. — Vol. 3. — Is. 3. — Pp. 58–63.

18. *Bhardwaj S.* Effect of Brown Gas On the Performance of a Four Stroke Gasoline Engine / S. Bhardwaj, A. S. Verma, S. K. Sharma // International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering. — 2014. — Vol. 4. — Is. 1. — Pp. 300–308.

19. *Leelakrishnan E.* Performance and Emission Characteristics of Brown's Gas Enriched Air in Spark Ignition Engine / E. Leelakrishnan, N. Lokesh, H. Suriyan // International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology. — 2013. — Vol. 2. — Is. 2. — Pp. 393–404.

20. *Alkhaniya A.* Concept of Six Stroke Engine / A. Alkhaniya, A. Kotiyal // International Journal of Mechanical and Industrial Technology. — 2014. — Vol. 2. — Is. 2. — Pp. 1–4.

21. *Makheeja D.* A Review: Six Stroke Internal Combustion Engine / D. Makheeja // Journal of Mechanical and Civil Engineering (IOSR-JMCE). — 2015. — Vol. 12. — Pp. 7–11.

22. *Kandari S.* Six Stroke Engine / Kandari, I. Gupta // International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT). — 2013. — Vol. 2. — Is. 10. — Pp. 884–889.

23. *Яманин А. И.* Численное моделирование виброактивности поршневых двигателей с продолженным расширением рабочего тела / А. И. Яманин, В. А. Жуков // Двигатели внутреннего сгорания. — 2014. — № 1. — С. 27–31.

24. *Жуков В. А.* Анализ алгоритмов расчета кинематики кривошипно-шатунных механизмов с прицепными шатунами / В. А. Жуков, А. И. Яманин // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С.О. Макарова. — 2016. — № 2 (36). — С. 109–118. DOI: 10.21821/2309-5180-2016-8-2-109-118.

25. *Яманин А. И.* Силовой анализ поршневого двигателя с использованием динамических моделей кривошипно-шатунного механизма / А. И. Яманин, В. А. Жуков, С. О. Барышников // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2018. — Т. 10. — № 1. — С. 191–200. DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-1-191-200.

26. *Яманин А. И.* Динамические расчеты поршневых двигателей в среде Microsoft Office Excel / А. И. Яманин. — Ярославль: Изд-во ЯГТУ, 2014. — 111 с.

REFERENCES

1. Erofeev, Valentin L., Vladimir A. Zhukov, and Alexandr S. Pryachin. “Energy and exergy approaches to assessment enhance the efficiency of heat engines”. *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 9.5 (2017): 1017–1026. DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-5-1017-1026.

2. Kaidash, N. F., K. K. Papok, E. V. Lyubanovskii, and Yu. P. Blonskii. *Vprysk vody v aviatsionnye dvigateli*. M.: Red.-izd. otdel Aeroflota, 1946.

3. Belousov, E. V., M. S. Ageev, and V. I. Sviridov. “The influence on working process of the average speed ship engine by water injection to the working cylinder.” *Dvigateli vnutrennego sgoraniya* 1 (2010): 40–43.

4. Mohandas, Gokul, and Virendra Desai-Patil. “Review of Six Stroke Engine and Proposal for Alternative Fuels.” *SSRG International Journal of Mechanical Engineering (SSRG-IJME)* 2.10 (2015): 19–24.

5. Bajulaz, Roger. US 4513568 B, IPC F 02 B 75/021. Method for the transformation of thermal energy into mechanical energy by means of a combustion engine as well as this new engine. USA assignee. Publ. 30 April 1985.

6. Bajulaz, Roger. US 4809511 B, IPC F02G 1/02. Internal Combustion Engine. USA assignee. Publ. 7 March 1989.

7. Pande, Prashant Haridas. “Velozeta Six Stroke Engine.” *International Journal of Research in Advent Technology* Special Issue (2015): 215–219.

8. Scott, Ronald Silver, B. Fiveland, and D. Ryan Williams. US 20140157758 A1, IPC F01N 3/2066, F01N 3/103. After-treatment system and method for six-stroke combustion cycle. USA assignee. App. 12.06.2014.

9. Bystrov, O. I. Povyshenie ekonomicheskikh i ekologicheskikh pokazatelei dizelya putem realizatsii kombinirovannogo shestitaktnogo tsikla. Abstract of PhD diss. Chelyabinsk.: Yuzhn.-Ur. gos. un-t, 2008.

10. Sobolenko, A. N. “Thermodynamic Efficiency of Generalized Theoretical Six-Cycle Engine.” *Bulletin of PNU* 1(36) (2015): 141–150.

11. Certificate of authorship SU 1617169 A1, IPC F01V 75/02. Sposob raboty shestitaktnogo dvigatelya vnutrennego sgoraniya.

12. Romanov, S. V. Povyshenie toplivnoi ekonomichnosti dvigatelei sel’skokhozyaistvennykh mashinno-traktornykh agregatov putem primeneniya vodnoi inzhektsii. PhD diss. Troitsk: Yuzhn.-Ur. gos. agrarn. un-t, 2017.

13. Karmalkar, Chinmayee, and Vivek Raut. “Analyzing the implementation of six stroke engine in a Hybrid Car.” *International Journal of Mechanical Engineering and Applications* 2.1 (2014): 1–4. DOI: 10.11648/j.ijmea.20140201.11.

14. Leferov, A. A., and N. D. Kupriyanov. “Aktual’nost’ i problemy sovershenstvovaniya tsikla DVS primeneniem neposredstvennogo vpryska vody.” *Trudy MAI* 39 (2010): 10.

15. Yusha, V. L., and G. I. Chemov. “The analysis of internal combustion engine with vapor and gas working mixture for ideal thermodynamics cycle efficiency.” *Omsk Scientific Bulletin* 3(83) (2009): 154–158.

16. Prasath, B. Rajendra, E. Leelakrishnan, N. Lokesh, H. Suriyan, E. Guru Prakash, K. Omur Mustaq Ahmed. “Hydrogen operated internal combustion engines–a new generation fuel.” *International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering* 2.4 (2012): 52–57.

17. Deepak Kumar, and N. Gowtham. "Hydrogen Fuel in 6-Stroke IC Engines and Reduction of Noxemission Using Hollow Fiber Membrane Module." *International Journal of Mechanical and Production Engineering (IJMPE)* 3.3 (2015): 58–63.

18. Bhardwaj, Shrikant, Ajay Singh Verma, and Subodh Kumar Sharma. "Effect of Brown gas on the performance of a four stroke gasoline engine." *International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering* 4.1 (2014): 300–308.

19. Leelakrishnan, E., N. Lokesh, and H. Suriyan. "Performance and emission characteristics of Brown's gas enriched air in spark ignition engine." *International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology* 2.2 (2013): 393–404.

20. Alkhaniya, Akash, and Aakash Kotiyal. "Concept of Six Stroke Engine." *International Journal of Mechanical and Industrial Technology* 2.2 (2014): 1–4.

21. Makheeja, D. "A Review: Six Stroke Internal Combustion Engine." *Journal of Mechanical and Civil Engineering (IOSR-JMCE)* 12 (2015): 7–11.

22. Kandari, S., and I. Gupta. "Six Stroke Engine." *International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT)* 2.10 (2013): 884–889.

23. Yamanin, A. I., and V. A. Zhukov. "Numerical simulation of vibration of piston engines with prolonged expansion of working medium." *Dvigateli vnutrennego sgoraniya* 1 (2014): 27–31.

24. Zhukov, Vladimir Anatolevich, and Alexander Ivanovich Yamanin. "The analysis of algorithms for calculation of kinematics of crankshaft-rod mechanism with the coupled connecting-rods." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova* 2(36) (2016): 109–118. DOI: 10.21821/2309-5180-2016-8-2-109-118.

25. Yamanin, Alexander I., Vladimir A. Zhukov, and Sergey O. Baryshnikov. "Force analysis of reciprocating engine using dynamic models of crank mechanism." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 10.1 (2018): 191–200. DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-1- 191-200.

26. Yamanin, A. I. *Dinamicheskie raschety porshnevykh dvigatelei v srede Microsoft Office Excel*. Yaroslavl': Izd-vo YaGTU, 2014.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Жуков Владимир Анатольевич —
доктор технических наук, профессор
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала
С. О. Макарова»
198035, Российская Федерация, Санкт- Петербург,
ул. Двинская, 5/7
e-mail: *zhukovva@gumrf.ru*, *va_zhukov@rambler.ru*
Яманин Александр Иванович —
доктор технических наук, профессор
ФГБОУ ВО «Ярославский государственный
технический университет»
150023, Российская Федерация, г. Ярославль,
Московский проспект, 88
e-mail: *yamaninai1@ystu.ru*, *a_yam@mail.ru*
Мельник Олеся Владимировна —
кандидат технических наук
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала
С. О. Макарова»
198035, Российская Федерация, г. Санкт-Петербург,
ул. Двинская, 5/7
e-mail: *olvmelnik@gmail.com*

INFORMATION ABOUT THE AUTORS

Zhukov, 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: *zhukovva@gumrf.ru*, *va_zhukov@rambler.ru*
Yamanin, Alexander I. —
Dr. of Technical Sciences, professor
Yaroslavl State Technical University
88 Moskovsky Av., Yaroslavl, 150023,
Russian Federation
e-mail: *yamaninai1@ystu.ru*,
a_yam@mail.ru
Melnik, Olesya V. —
PhD
Admiral Makarov State University of Maritime
and Inland Shipping
5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg, 198035,
Russian Federation
e-mail: *olvmelnik@gmail.com*

Статья поступила в редакцию 12 декабря 2018 г.
Received: December 12, 2018.

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

DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-6-1255-1263

TECHNIQUE AND TECHNOLOGY OF MAINTAINING LIFE IN A CONFINED SPACE

M. I. Klyushenkova, V. I. Nazarov, A. P. Popov

NIC "Kurchatov Institute" — IREA, Moscow, Russian Federation

The problems of maintaining life in the closed space of submarines are considered. The analysis of the electrolytic method of obtaining oxygen. Recommendations on improving the system of oxygen supply for boat personnel are given. A flowchart of oxygen production using a 15–20 % potassium carbonate solution as an electrolyte is given, which makes it possible to organize an energy-saving closed circuit. In this scheme, the following gases are subject to utilization: hydrogen and carbon dioxide supplied to methanol synthesis. On existing submarines, where similar technologies of oxygen production are used, methanol synthesis is carried out on a solid copper-zinc catalyst at a pressure of 3.6 MPa and a temperature of 270 ° C. In this paper, it is proposed to replace the two-phase methanol synthesis system with a three-phase, more economical one. Synthesis of methanol is carried out in a reactor filled with an inert hydrocarbon high boiling liquid, in which the copper-zinc catalyst is suspended, which creates a large contact surface with synthesis gas and provides methanol output in one cycle up to 15–20 %, higher than in the two-phase system (4–5 %). The presence of hydrocarbon liquid and its circulation (reactor-boiler-utilizer) allows the synthesis of methanol in the autothermal mode. Reducing the hydraulic resistance in the reactor allows to reduce the pressure level and carry out the synthesis at a pressure of 3 MPa. Taking into account that the synthesis process takes place in a closed volume, there is practically no wear of the catalyst. The three-phase system is environmentally safe when used in the life support system of a submarine. A block diagram of a three-phase system of methanol synthesis is presented, and the structures of the main apparatus are developed: synthesis reactor, heat exchange and condensation equipment.

Keywords: closed systems, life support, electrolysis, oxygen, carbon dioxide, hydrogen, methanol, synthesis, catalyst, reactor, water object.

For citation:
Klyushenkova, Marina I., Vyacheslav I. Nazarov, and Aleksandr P. Popov. "Technique and technology of maintaining life in a confined space." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 10.6 (2018): 1255–1263. DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-6-1255-1263.

УДК 66-935.3

ТЕХНИКА И ТЕХНОЛОГИЯ ПОДДЕРЖАНИЯ ЖИЗНИ В ЗАМКНУТОМ ПРОСТРАНСТВЕ

М. И. Клюшенкова, В. И. Назаров, А. П. Попов

НИЦ «Курчатовский институт» — ИРЕА, Москва, Российская Федерация

Рассмотрены проблемы поддержания жизни в замкнутом пространстве подводных лодок. Проведен анализ электролитического способа получения кислорода. Даны рекомендации по усовершенствованию системы обеспечения персонала лодки кислородом. Дана блок-схема получения кислорода с использованием в качестве электролита 15–20-процентного раствора карбоната калия, что позволяет организовать энергоэкономичную замкнутую схему. Утилизации в этой схеме подлежат газы: водород и диоксид углерода, поступающие на синтез метанола. На существующих подводных лодках, где используются аналогичные технологии производства кислорода, синтез метанола проводят на твердом медно-цинковом катализаторе при давлении 3,6 МПа и температуре 270 °С. В данной работе предлагается заменить двухфазную систему синтеза метанола на трехфазную, более экономичную: синтез метанола проводить в реакторе, заполненном инертной углеводородной высококипящей жидкостью, в которой во взвешенном состоянии находится медно-цинковый катализатор, что создает большую поверхность контакта с синтез-газом и обеспечивает выход метанола за один цикл на 15–20 % выше, чем в двухфазной системе (4–5 %). Наличие углеводородной жидкости и ее циркуляция (реактор – котел – утилизатор) позволяет проводить синтез метанола в автотермичном режиме. Снижение гидравлического сопро-

тивления в реакторе позволяет уменьшить уровень давления и проводить синтез при давлении 3 МПа. С учетом того, что процесс синтеза проходит в замкнутом объеме, практически нет износа катализатора. Трехфазная система экологически безопасна при использовании ее в системе жизнеобеспечения подводной лодки. Представлена блок-схема трехфазной технологии синтеза метанола, разработаны конструкции основных аппаратов: реактор синтеза, теплообменное и конденсационное оборудование.

Ключевые слова: замкнутые системы, жизнеобеспечение, электролиз, кислород, диоксид углерода, водород, метанол, синтез, катализатор, реактор, водный объект.

Для цитирования:
Клюшенкова М. И. Техника и технология поддержания жизни в замкнутом пространстве / М. И. Клюшенкова, В. И. Назаров, А. П. Попов // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2018. — Т. 10. — № 6. — С. 1255–1263. DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-6-1255-1263.

Введение (Introduction)

Существуют три проблемы поддержания жизни в замкнутом пространстве подводных лодок: проблема содержания необходимого для дыхания количества воздуха, проблема чистой воды и проблема обеспечения определенной температуры в отсеках лодки.

Химический состав воздуха имеет важное гигиеническое значение, так как играет решающую роль в осуществлении дыхательной функции организма человека. Атмосферный сухой воздух представляет собой смесь кислорода, азота, углекислого газа, аргона и других инертных газов в соотношениях, приведенных в табл. 1 [1], [2]. Влажность вдыхаемого воздуха не должна быть повышенной [3].

Таблица 1

Состав атмосферного и выдыхаемого человеком воздуха

Наименование газа	Содержание в воздухе (% от объема)	
	атмосферном	выдыхаемом
Кислород	20,94	15,4–16,0
Углекислый газ	0,04	3,4–4,7
Азот	78,08	~78,26
Аргон, гелий, неон, криптон, ксенон, водород, озон, радон	0,94	~0,94

Кислород (O_2) — наиболее важная для человека составная часть воздуха. В состоянии покоя человек обычно поглощает в среднем 0,3 л кислорода в 1 мин. При физической деятельности потребление кислорода резко возрастает и может достигать 4,5–5,0 л и более в 1 мин. Колебания содержания кислорода в атмосферном воздухе невелики и не превышают, как правило, 0,5 %. Обычно физиологические сдвиги наблюдаются у человека при снижении содержания кислорода при дыхании до 16–17 %. Если его содержание уменьшается до 11–13 %, то появляются ярко выраженная кислородная недостаточность, резкое ухудшение самочувствия и снижение работоспособности. Содержание кислорода до 7–8 % может привести к смертельному исходу. Углекислый газ (CO_2), образующийся при дыхании и накапливаемый в замкнутом пространстве, наносит человеку вред. При продолжительном вдыхании воздуха с содержанием 1,0–1,5 % углекислого газа отмечается ухудшение самочувствия, а при 2,0–2,5 % в организме обнаруживаются паталогические сдвиги. Значительные нарушения функций организма и снижение работоспособности происходят, когда содержание углекислого газа составляет 4–5 %. При содержании 8–10 % происходит потеря сознания и смерть. Значительное повышение углекислого газа в воздухе может возникнуть при аварийных ситуациях в замкнутых пространствах подводных лодок.

Проблема подачи чистой воды решается следующим образом: на большинстве подводных лодок установлены дистилляционные аппараты, которые опресняют морскую воду. Эта вода используется главным образом для охлаждения электроприборов, приготовления пищи и личной

гигиены персонала. Поддержание определенной температуры в отсеках лодки возможно за счет съема внутреннего тепла морской водой. Для поддержания благоприятной положительной температуры для экипажа объем лодки необходимо обогревать. Электропитание для обогрева может поступать с ядерных реакторов, дизельных двигателей или батарей.

Целью данной работы является совмещение и усовершенствование двух технологий: регенерации воздуха для дыхания и получения метанола при утилизации углекислого газа с целью создания современной, энергоэкономичной и эффективной технологии жизнеобеспечения в замкнутом пространстве подводной лодки.

Методы и материалы (Methods and Materials)

Анализ технологий получения кислорода. Современная подводная лодка обычно находится в погруженном состоянии в течение длительного времени и не может обновлять свой внутренний воздух. В связи с этим должна быть создана замкнутая система жизнеобеспечения, в которой выработка кислорода может осуществляться за счет физико-химических процессов [1] или биологических (последний используется для космических станций [4]).

Кислород можно получать за счет химических реакций (ХР), основанных на эффекте разложения хлората, перхлората, перекиси водорода или пероксида натрия. Широкое применение нашла реакция получения кислорода высокой степени очистки при разложении перекиси водорода с помощью перманганатного катализатора ($KMnO_4$) [5]:

$$2H_2O_2 \rightarrow 2H_2O + O_2\uparrow. \quad (1)$$

Возможно термохимическое разложение твердых кислородсодержащих соединений, например, хлората натрия. При многих химических реакциях кислород выделяется в незначительных объемах и используется на объектах с низким энергообеспечением. Увеличение объемов возможно при электролитическом получении кислорода из воды. Основным аппаратом при электролизе является камера с катодом и анодом, разделенная диафрагмой. Щелочные электролизеры воды (ЩЭВ) работают до температуры 120 °С. На электрические характеристики ЩЭВ оказывают влияние плотность тока, давление и температура. В России выпускают электролизеры на АО «Уралхиммаш», но они имеют устаревшую конструкцию. Модернизация идет по пути внедрения новых электродных материалов, позволяющих снизить энергопотребление. В Российской Федерации для стратегических отраслей промышленности часто закупают электролизеры у фирмы *Hydrogenics* (Бельгия), имеющие следующие технические характеристики: удельное энергопотребление — не выше 4,3 кВт·ч/нм^3 выделяемого H_2 (отечественные электролизеры потребляют 5,5 кВт·ч/нм^3); сила тока — 400–1000 мА/см^2; напряжение — 1,6–1,9 В; рабочие температуры — 100–120 °С; давление — 1–20 МПа. В Российской Федерации ведутся работы по созданию высокоэффективных электролизеров с энергопотреблением 4,2–4,8 кВт·ч/нм^3. Эта проблема может быть решена посредством разработки новых электродов с эффективными и дешевыми катализаторами. В НИУ «МЭИ» создан и запатентован метод изготовления композитных электродов с пористым никелевым покрытием [6].

Современные диафрагмы для электролиза представляют собой губчатую пористую матрицу из щелочестойкого полимера полисульфонового ряда с частицами наполнителя (диоксида титана или полисурьмяной кислоты). Наполнители могут быть изготовлены на основе субмикронных и наноразмерных волокон [7].

Безотходная технология обеспечения кислородом в замкнутых системах. Предлагаемая технология жизнеобеспечения кислородом в условиях подводной лодки должна решить следующие задачи:

– создание искусственной воздушной среды, близкой по составу и основным свойствам к атмосферному воздуху, для чего необходима генерация кислорода;

– удаление из воздуха диоксида углерода и его утилизация;

– на базе водорода и диоксида углерода получение водного раствора метанола, который можно сбросить в водную среду.

На рис. 1 представлена блок-схема снабжения кислородом в системе жизнеобеспечения. Электролит приготавливают в баке *4*. Первоначально в дистиллированной воде растворяют карбонат калия (ОЧ поташ). Затем электролит насосом *3* под давлением перекачивают в электролизер *5*. Концентрация K_2CO_3 — в диапазоне 15–20 %. После прохождения рабочего цикла электролит возвращается в бак *4*, а затем в электролизер *5*, т. е. работа ведется на оборотном потоке поташа. Раствор электролита слабощелочной. Давление в электролизере — 0,7 МПа. Под действием электрического тока на аноде идет выделение газа кислорода ($O_2\uparrow$), а на катоде — выделение положительно заряженных ионов водорода (H^+). Ионы водорода принимают электроны, образуя газообразный водород (H_2). Помимо газов, из электролизера *5* выводятся в жидкой фазе католит (КОН) и анолит ($KHCO_3$). В разделительных колонках *2* за счет десорбции из католита выделяют кислород, из анолита — водород. Анолит поступает в десорбер *10*, нагревается до температуры 114 °С и проходит реакция разложения с выделением газа CO_2:

$$2KHCO_3 \rightarrow K_2CO_3 + CO_2 + H_2O. \quad (2)$$

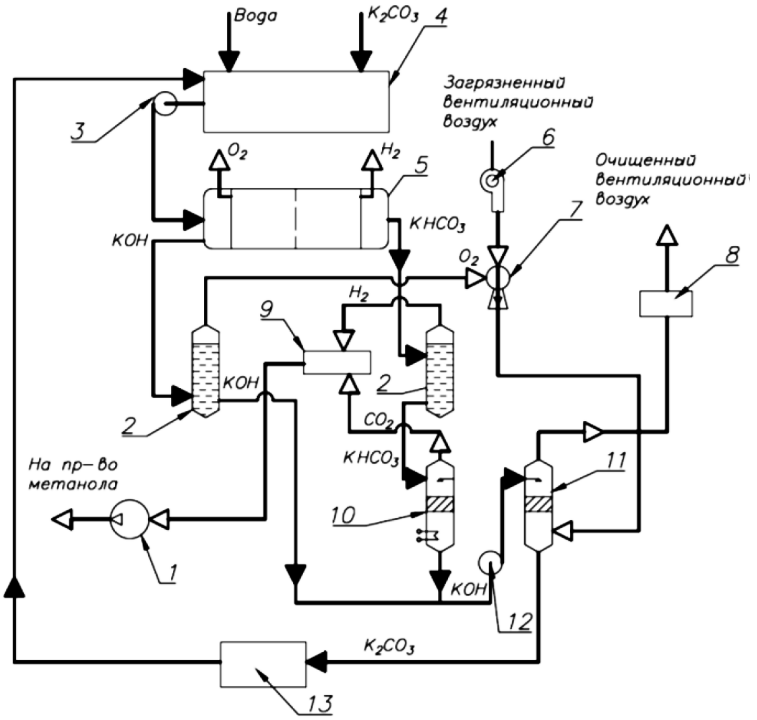


Рис. 1. Блок-схема снабжения кислородом системы жизнеобеспечения:
1 — компрессор; *2* — разделительные колонки; *3* — насос подачи электролита; *4* — бак; *5* — электролизер; *6* — вентилятор; *7* — инжектор; *8* — блок доочистки воздуха; *9* — бак смешения газов; *10* — десорбер; *11* — абсорбер; *12* — насос подачи КОН; *13* — бак отработанного K_2CO_3

Из десорбера *10* жидкая фаза направляется в бак *13*, где осуществляется сбор отработанных растворов карбоната калия. Диоксид углерода, выделяемый при десорбции, поступает в бак смешения газов *9*. Кислород, выделяемый на аноде в электролизере *5*, и кислород после отгонки в разделительной колонне *2* подсасываются инжектором *7* в вентиляционный воздух, поступающий из отсеков подводной лодки и содержащий повышенную концентрацию CO_2. Загрязненный воздух поступает на очистку от CO_2 в абсорбер *11*.

На стадии очистки загрязненного воздуха от CO_2 в представленной блок-схеме рекомендуется вести абсорбционную очистку щелочными растворами, в частности, раствором щелочи КОН. При взаимодействии с растворами щелочей протекает необратимая реакция. Первоначально парциальное давление CO_2 над раствором равно нулю вплоть до полного использования щелочи КОН:

$$2KOH + CO_2 \rightarrow K_2CO_3 + H_2O. \quad (3)$$

Затем равновесное парциальное давление возрастает, образуются карбонатные соли и протекают реакции с образованием бикарбоната калия:

$$K_2CO_3 + CO_2 + H_2O = 2KHCO_3. \quad (4)$$

Лимитирующей стадией является реакция CO_2 с ионами гидроксила OH^- и HCO_3^-:

$$CO_2 + OH^{--} \rightarrow HCO_3^{--}; \quad (5)$$

$$OH^{--} + HCO_3^{--} \rightarrow H_2O + CO_3^{2--}. \quad (6)$$

Выбор щелочи КОН, а не NaOH для очистки от CO_2 целесообразен, так как физическая растворимость CO_2 водным раствором щелочи КОН выше, чем в растворах NaOH, что предопределяет более высокую скорость абсорбции [8].

Скорость абсорбции CO_2 водным раствором щелочи КОН увеличивается с ростом температуры. Повышение температуры с 25 до 45 °С приводит к увеличению скорости процесса на 40–50 %. При малой концентрации CO_2 в газовой смеси (0,1–1,0 %) щелочная очистка лимитируется сопротивлением в газовой фазе и обычно проводится в насадочных колоннах. При больших концентрациях (3–5 % CO_2) сопротивление абсорбции сосредоточено в жидкой фазе. Увеличение концентрации щелочи в растворе снижает скорость абсорбции, поэтому раствор КОН используют с начальной концентрацией не более 10 % и конечной — 1,5 %. Как показали исследования, при давлении 0,1 МПа коэффициент массопередачи процесса абсорбции в насадочной колонне составляет не менее 20 кмоль/м^3·ч [8]. Давление на стадии абсорбции поддерживают равным 0,5–0,6 МПа, что позволяет без насосов транспортировать отработанный раствор в бак *4*.

Очищенный воздух циркулирует внутри корабля при помощи нескольких газодувок. Контроль постоянно ведется за составом воздуха, который приходит после хемосорбции CO_2 из аппарата *11* и поступает в специальные фильтры *8*, где удаляются остатки CO_2, влага и др. Из бака смешения газов *9* водород и углекислый газ компрессором направляют на стадию производства водного раствора метанола. Данная стадия необходима для того, чтобы сбрасывать отходящие газы в виде раствора в океан.

Анализ технологий производства метанола. Смесь газов H_2 и CO_2 образует синтез-газ, который при определенном давлении 3–10 МПа и температуре 210–270 °С на медно-цинковом катализаторе вырабатывает метанол. Реакция идет с выделением достаточно большого количества тепла (50,5 кДж/моль), которое необходимо снимать в реакторе синтеза. В промышленных масштабах в мире, в том числе на подводных лодках, получение метанола проводят в основном на твердом катализаторе, т. е. в двухфазовой газовой системе. Недостатком этой системы является то, что при одноактном контакте синтез-газа с катализатором образуется 4,0–5,0 % метанола от общего объема газовой смеси, поэтому для дальнейшего повышения выхода метанола применяют многократную систему циркуляции газа. Для этого необходим циркуляционный компрессор, а для нагрева циркуляционного газа до начала реакции — дополнительный теплообменник [9], [10].

Процесс синтеза метанола можно проводить в трехфазной системе: твердый катализатор находится в инертной углеводородной жидкости, а синтез-газ проходит через нее, вступая в контакт с катализатором. Инертная жидкость используется для съема тепла реакции образования метанола. В трехфазной системе жидкая фаза обеспечивает практически изотермический процесс синтеза, а измельченный катализатор, находящийся в подвижном состоянии в жидкости, создает более полный контакт его с газовой смесью. Это предопределяет более высокий (до 15–20 %) выход метанола при одноразовом контакте.

Трехфазный синтез метанола был предложен в 1970 гг. американской компанией *Chemical Systems* [11]. Первый вариант этой технологии был разработан Институтом исследований по электроэнергетике США совместно с фирмой *Chemical Systems*. Данная технология известна под торговой маркой LPMEOH. Запатентовано несколько различных модификаций этого процесса [12].

Наиболее интенсивно LPMEOH-процесс разрабатывался в период 1982–2003 гг. В результате исследований были выявлены основные закономерности синтеза метанола. Отличительным признаком данной технологии является применение катализатора в форме суспензии. Был использован катализатор $CuO–ZnO–Al_2O_3/SiO_2$. Концентрация гетерогенного катализатора составляла 10–30 масс. %. Имеются в наличии сообщения об эффективности модифицирования медьсодержащих катализаторов оксидом циркония. Установлено, что гетерогенный контакт CuO–ZnO при синтезе газовой смеси H_2/CO_2 ведет к возможности снижения уровня давления в реакторе, т. е. оптимальным становится давление 3 МПа при температуре 240–250 °С. Выход метанола за один проход может достигать 35–40 % [10]. В трехфазной системе получения метанола катализатор стабилен, а при двухфазном режиме он достаточно быстро дезактивируется.

Важным параметром каталитической суспензии является дисперсность катализатора. При уменьшении размера частиц увеличивается площадь активной поверхности катализатора, снижается сопротивление массопереносу и повышается устойчивость суспензии, а также увеличивается производительность по метанолу. Как показали зарубежные исследования, размеры частиц катализатора должны быть в диапазоне 40–70 мкм. Выбор жидкой дисперсионной среды также очень важен, так как от физических характеристик жидкости зависит массоперенос и теплообмен. Процесс синтеза исследован в инертных парафиновых средах, плотность которых должна быть меньше, чем у метанола и воды, а температура кипения — выше рабочей температуры синтеза метанола. Жидкая фаза обеспечивает автотермичность процесса синтеза, оказывает влияние на скорость реакции и даже на величину энергии активации. Наилучшими жидкими средами являются смеси из парафинов и нафтенов (65 % парафины $C_{16–38}$ и 35 % нафтены). Плотность такой смеси составляет 0,849 г/см^3, вязкость — 31,2 сП при 25 °С, температура кипения — 316 °С, что дает невысокую долю испарения (не более 1 % от объема жидкости) [12]–[14].

Разработка трехфазной системы синтеза метанола. Разработана блок-схема малотоннажной установки получения метанола в трехфазной системе (рис. 2).

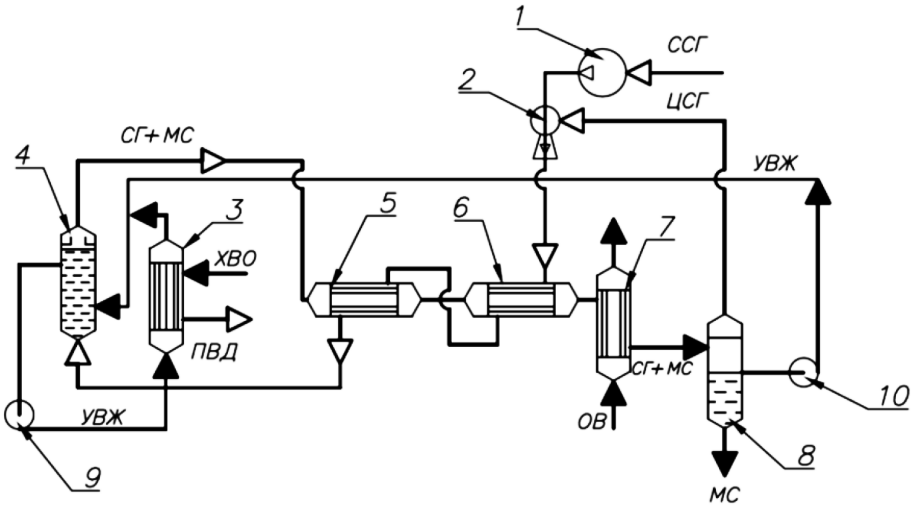


Рис. 2. Блок-схема схема установки получения метанола:
1 — компрессор; *2* — инжектор; *3* — котел; *4* — реактор кипящего слоя; *5*, *6* — теплообменники; *7* — холодильник-конденсатор; *8* — конденсационная колонна; *9*, *10* — насосы; СГ — синтез-газ; ССГ — свежий синтез-газ; ЦСГ — циркуляционный синтез-газ; МС — метанол-сырец; ХОВ — химически очищенная вода; ОВ — охлаждающая вода; ПВД — пар высокого давления; УВЖ — углеводородная жидкость

Свежая смесь (синтез-газ) подается компрессором *1* при давлении 3,6 МПа в инжектор *2*, который подсасывает циркуляционный газ, смешиваясь со свежим газом. Далее газ подогревается в теплообменниках *5* и *6* до $T = 270$ °С и поступает в реактор кипящего слоя *4*, где происходит образование метанола на медно-цинковом катализаторе. До начала процесса в реактор закачивается

инертная углеводородная жидкость с температурой кипения 360 °С для отвода тепла реакции. Нагретая УВЖ выводится из зоны реакции насосом *9*, отдает тепло в котле *3*, вырабатывающем водяной пар высокого давления, и возвращается в реактор *4*. Смесь продуктов реакции синтеза и непрореагировавших синтез-газов (ЦСГ + МС) выходит из верхней части реактора *4*, проходит теплообменники *5* и *6*, охлаждается и поступает для конденсации в аппараты *7* и *8*. После конденсации и вывода метанола-сырца непрореагировавший газ направляется в инжектор, смешивается со свежим синтез-газом и после нагрева возвращается в реактор *4*. Унесенная вместе с газом УВЖ конденсируется в конденсационной колонне *8*, отслаивается от метанола и насосом *10* возвращается в реактор *4*.

Значительно уменьшенный рабочий объем газовой смеси может быть обеспечен циркуляцией с использованием инжектора вместо циркуляционного компрессора, что позволит существенно снизить расход электроэнергии и упросить технологическую схему производства метанола.

Образование метанола происходит с выделением тепла. Это тепло обеспечивает автотермичность процесса синтеза и используется в схеме для получения пара давлением до 2,7 МПа. Основные расходные показатели на тонну получаемого метанола представлены в табл. 2 [9].

Таблица 2

Основные расходные показатели на тонну получаемого метанола

Реакция $3H_2 + CO_2 = CH_3OH + H_2O$	
H_2	2100 нм^3
CO_2	700 нм^3
Расход электроэнергии	53 кВт
Расход воды на конденсацию	0,5 м^3

Для синтеза 1 т/ч метанола требуется 1,0 м^3 медно-цинкового катализатора с размерами гранул 0,5–1,0 мм. Для обеспечения псевдоожиженного движения гранул катализатора в жидком слое требуется 0,3 м^3 УВЖ на 1,0 м^3 катализатора, при этом скорость подачи газовой фазы должна быть выше скорости псевдоожижения гранул катализатора. УВЖ практически не расходуется, так как циркулирует в замкнутом объеме цикла синтеза метанола.

При проведении синтеза метанола H_2/CO_2 кроме воды образуются диметиловый эфир до 1,6 % и высшие спирты до 1,2 %. Эти примеси выводятся вместе с образовавшимся метанолом во внешнюю среду.

Предлагаемая установка получения метанола экологически безопасна, так как весь процесс происходит в замкнутом объеме. Износ катализатора в трехфазной системе практически исключается, так как катализатор движется в жидкой среде. Для трехфазной системы применяемая объемная скорость ниже, чем для двухфазной (3000 – 6000 ч$^{-1}$ по сравнению с 8000 – 12000 ч$^{-1}$).

Выводы (Summary)

На основании проведенного исследования можно сделать следующие выводы:

1. Предложено заменить существующую двухфазную технологию производства метанола на трехфазную, где твердый медно-цинковый катализатор находится в инертной высококипящей углеводородной жидкости во взвешенным состоянии.

2. Трехфазная технология существенно проще двухфазной, она менее энергоемкая, за один цикл синтеза вырабатывается 15–20 % метанола-сырца.

3. Наличие циркуляции высококипящей углеводородной жидкости (реактор – котел – утилизатор) позволяет проводить синтез метанола в автотермичном режиме.

4. Процесс синтеза метанола экологически безопасен, проходит в замкнутом объеме, что практически исключает износ катализатора.

5. Разработано высокоэффективное оборудование для трехфазной технологии синтеза метанола, которое за счет совмещения стадий процесса позволит создать мобильную установку для жизнеобеспечения экипажа подводной лодки.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Гладышев Н. Ф.* Системы и средства регенерации и очистки воздуха обитаемых герметичных объектов / Н. Ф. Гладышев, Т. В. Гладышева, С. И. Дворецкий. — М.: Спектр, 2016. — 203 с.

2. *Клопкова Е. В.* Атмосферный воздух, его физические и химические свойства, гигиеническое и экологическое значение: метод. разработка по дисциплине «Гигиена и экология человека» / Е. В. Клопкова. — Изд-во Коломенского медицинского колледжа, 2012. — 33 с.

3. *Trent R. W.* Кондиционирование воздуха на подводных лодках / R. W. Trent // АВОК: вентиляция, отопление, кондиционирование воздуха, теплоснабжение и строительная теплофизика. — 2003. — № 5. — С. 64–71.

4. *Гительзон И.* Замкнутые системы жизнеобеспечения / И. Гительзон, А. Дегерменджи, А. Тихомиров // Наука в России. — 2011. — №6 (186). — С. 4–10.

5. *Мирошниченко Ю. В.* Характеристика способов получения кислорода медицинского и перспективы их применения в военном здравоохранении / Ю. В. Мирошниченко, Р. А. Еникеева, Е. М. Кассу // Вестник Российской военно-медицинской академии. — 2016. — № 2 (54). — С. 157–163.

6. *Кулешов В. Н.* Высокоэффективные композитные катоды для щелочного электролиза воды / В. Н. Кулешов [и др.] // Журнал прикладной химии. — 2017. — Т. 90. — № 3. — С. 327–331.

7. *Кулешов В. Н.* Новые диафрагменные материалы для электролизеров воды с щелочным электролитом / Н. В. Кулешов, Ю. А. Славнов, В. Н. Кулешов, С. А. Довбыш // Естественные и технические науки. — 2013. — № 6 (68). — С. 59–63.

8. *Клюшенкова М. И.* Защита окружающей среды от промышленных газовых выбросов: учебное пособие / М. И. Клюшенкова, А. В. Луканин. — М.: Изд-во МГУИЭ, 2012. — 144 с.

9. *Продан В. Д.* Малотоннажное производство метанола / В. Д. Продан, М. И. Клюшенкова, Е. И. Бородачева // Химическое и нефтегазовое машиностроение. — 2013. — № 7. — С. 17–18.

10. Технологии производства метанола: современные тенденции [Электронный ресурс]. — Режим доступа: http://www.newchemistry.ru/printletter.php?n_id=3448 (дата обращения: 01.12.2018).

11. Pat. 4031123 USA, IPC C07C 29/1512 Methanol production in a paraffinic medium / R. L. Espino, T. S. Pletzke; Chem Systems Inc. assignee. — № US4031123A; app. 21.11.1975; Pub. 21.06.1977. — 5 p.

12. *Хаджиев С. Н.* Slurry-технология в синтезе метанола (обзор) / С. Н. Хаджиев, Н. В. Колесниченко, Н. Н. Ежова // Нефтехимия. — 2016. — Т. 56. — № 2. — С. 95. DOI: 10.7868/S0028242116020076.

13. *Загашвили Ю. В.* Комплекс получения синтез-газа для малотоннажного производства метанола / Ю. В. Загашвили, В. Н. Ефремов, А. М. Кузьмин, И. И. Лищинер // НефтеГазоХимия. — 2017. — № 1. — С. 19–26.

14. *Кемалов Р. А.* Технологии получения и применения метанола: учебное пособие / Р. А. Кемалов, А. Ф. Кемалов. — Казань: Изд-во КГУ, 2016. — 167 с.

REFERENCES

1. Gladyshev, N. F, T. V. Gladysheva, and S. I. *Dvoretskii. Sistemy i sredstva regeneratsii i ochistki vozdukha obitaemykh germetichnykh ob"ektov.* M.: Izdatel'skii dom «Spektr», 2016.

2. Klopkova, E. V. *Atmosfernyi vozdukh, ego fizicheskie i khimicheskie svoistva, gigienicheskoe i ekologicheskoe znachenie: met. razrab. po distsipline «Gigiena i ekologiya cheloveka».* Kolomenskii meditsinskii kolledzh, 2012.

3. Trent, R. W. "Konditsionirovanie vozdukha na podvodnykh lodkakh." *AVOK: ventilyatsiya, otoplenie, konditsionirovanie vozdukha, teplosnabzhenie i stroitel'naya teplofizika* 5 (2003): 64–71.

4. Gitel'zon, I., A. Degermendzhi, and A. Tikhomirov. "Zamknutye sistemy zhizneobespecheniya." *Nauka v Rossii* 6(186) (2011): 4–10.

5. Miroshnichenko, Yu. V., R. A. Yenikeieva, and E. M. Kassu. "Characteristics of producing medical oxygen and prospects of its usage in military health care." *Vestnik of Russian military medical Academy* 2(54) (2016): 157–163.

6. Kuleshov, V. N., N. V. Kuleshov, S. A. Dovbysh, E. Y. Udris, Y. A. Slavnov, S. A. Grigoriev, and N. A. Yashtulov. "High-performance composite cathodes for alkaline electrolysis of water." *Russian Journal of Applied Chemistry* 90.3 (2017): 389–392. DOI: 10.1134/S1070427217020107.

7. Kuleshov, V. N., Yu. A. Slavnov, V. N. Kuleshov, and S. A. Dovbysh. "Novye diafragmennye materialy dlya elektrolizerov vody s shchelochnym elektrolitom." *Estestvennye i tekhnicheskie nauki* 6(68) (2013): 59–63.

8. Klyushenkova, M. I., and A. V. Lukanin. *Zashchita okruzhayushchei sredy ot promyshlennykh gazovykh vybrosov: uchebnoe posobie*. M.: MGUIE, 2012.

9. Prodan, V. D., M. I. Klyushenkova, and E. I. Borodacheva. "Malotonnazhnoe proizvodstvo metanola." *Khimicheskoe i neftegazovoe mashinostroenie* 7 (2013): 17–18.

10. Tekhnologii proizvodstva metanola: sovremennye tendentsii. Web. 1 Dec. 2018 <http://www.newchemistry.ru/printletter.php?n_id=3448>.

11. Espino, Ramon L., and Thomas S. Pletzke. US 4031123 B, IPC C07C 29/1512. Methanol production in a paraffinic medium. USA assignee. Publ. 21 June 1977.

12. Khadzhiev, S. N., N. V. Kolesnichenko, and N. N. Ezhova. "Slurry-technology in methanol synthesis (Review)." *Petroleum Chemistry* 56.2 (2016): 77–95. DOI: 10.1134/S0965544116020079.

13. Zagashvily, Yu. V., V. N. Efremov, A. M. Kuzmin, and I. I. Lishiner. "Complex for obtaining synthesis-gas for smalltonnage production of methanol." *OIL & GAS CHEMISTRY* 1 (2017): 19–26.

14. Kemalov, R.A., and A.F. Kemalov. *Tekhnologii polucheniya i primeneniya metanola: uchebnoe posobie*. Kazan': Kazan. Un-t, 2016.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Клюшенкова Марина Ивановна —
кандидат технических наук, доцент
ФГУП «Институт химических реактивов
и особо чистых химических веществ
Национального исследовательского центра
«Курчатовский институт»
107076, Российская Федерация, Москва,
ул. Богородский Вал, 3
e-mail: *klyushenkova@gmail.com*

Назаров Вячеслав Иванович —
кандидат технических наук, доцент
ФГУП «Институт химических реактивов
и особо чистых химических веществ
Национального исследовательского центра
«Курчатовский институт»
107076, Российская Федерация, Москва,
ул. Богородский Вал, 3
e-mail: *nazarov_vi41@mail.ru*

Попов Александр Павлович —
младший научный сотрудник
ФГУП «Институт химических реактивов
и особо чистых химических веществ
Национального исследовательского центра
«Курчатовский институт»
107076, Российская Федерация, Москва,
ул. Богородский Вал, 3
e-mail: *schrei6@yandex.ru*

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Klyushenkova, Marina I. —
PhD, associate professor
Institute of Chemical Reagents
and Highly Pure Chemicals
of the National Research Center
«Kurchatov Institute»
3 Bogorodsky Val Str., Moscow, 107076,
Russian Federation
e-mail: *klyushenkova@gmail.com*

Nazarov, Vyacheslav I. —
PhD, associate professor
Institute of Chemical Reagents
and Highly Pure Chemicals
of the National Research Center
«Kurchatov Institute»
3 Bogorodsky Val Str., Moscow, 107076,
Russian Federation
e-mail: *nazarov_vi41@mail.ru*

Popov, Aleksandr P. —
Junior Researcher
Institute of Chemical Reagents
and Highly Pure Chemicals
of the National Research Center
«Kurchatov Institute»
3 Bogorodsky Val Str., Moscow, 107076,
Russian Federation
e-mail: *schrei6@yandex.ru*

Статья поступила в редакцию 10 декабря 2018 г.
Received: December 10, 2018.

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

ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ КОМПЛЕКСЫ И СИСТЕМЫ

DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-6-1264-1276

BOOSTER VOLTAGE CORRECTOR WITH USE OF STANDARD VOLTAGE FORM

V. G. Sugakov, N. S. Varlamov, Yu. S. Malyshev

Volga state university of water transport, Nizhny Novgorod, Russian Federation

The destabilizing factor of various kinds influences on a quality electrical energy in ship electric power systems. These factors include the connection of nonlinear electrical energy converters and the asymmetry of loads, and other consumers with non-linear characteristics. Traditionally, the compensating devices used in practice do not allow a comprehensive approach to improving a quality of electrical energy. It is expedient to switch to the use of multifunctional systems for improving the quality of electric energy in such conditions. For this purpose, a voltage corrector based on the boost voltage has been designed and tested, which, by approximating the shape of the voltage curve to the reference one, simultaneously eliminates unbalance of phase voltages and reduces harmonic distortions for power consumers. One of the measures to justify the use of a voltage corrector is simulation, in which the ship's electric power system is the object of research. Based on the simulation results, the coefficients of harmonic distortion and asymmetry coefficients were determined by reverse and zero sequence are determined. It is revealed that the use of a memory block with storage of the reference voltage form in the control system allows to sufficiently reduce the harmonic voltage distortion and the unbalance of the phase voltages at the output of the voltage corrector. However, it has been established that the use of a voltage corrector leads to a voltage distortion on the side of the generator, and also slightly increases the voltage asymmetry by reverse sequence in the case of an active load. The results of the research show the practical possibility of implementing a voltage corrector in the structure of the ship electric power system with limited power of the generator set.

Keywords: booster transformer, ship power network, voltage corrector, harmonic distortion, asymmetry.

For citation:
Sugakov, Valerij G., Nikita S. Varlamov, and Yury S. Malyshev. "Booster voltage corrector with use of standard voltage form." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 10.6 (2018): 1264–1276. DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-6-1264-1276.

УДК 621.314.222.766

ВОЛЬТОДОБАВОЧНЫЙ КОРРЕКТОР НАПРЯЖЕНИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЭТАЛОННОЙ ФОРМЫ НАПРЯЖЕНИЯ

В. Г. Сугаков, Н. С. Варламов, Ю. С. Малышев

ФГБОУ ВО «Волжский государственный университет водного транспорта»,
Нижний Новгород, Российская Федерация

В судовых электроэнергетических системах качество электрической энергии зависит от различного рода дестабилизирующих факторов. К этим факторам относится подключение нелинейных преобразователей электрической энергии, несимметричных нагрузок и других потребителей с нелинейной характеристикой. Традиционно применяемые на практике компенсирующие устройства не позволяют осуществить комплексный подход к повышению качества электрической энергии. В таких условиях целесообразным является переход к использованию многофункциональных систем повышения качества электрической энергии. С этой целью разработан и исследован корректор напряжения на основе вольтодобавочного напряжения, который за счет приближения формы кривой напряжения к эталонной позволяет одновременно устранять небаланс фазных напряжений и уменьшать гармонические искажения для питания потребителей электрической энергии.

Одной из мер по обоснованию применения корректора напряжения является имитационное моделирование, в котором объектом исследования является судовая электроэнергетическая система. На ос-

нове результатов моделирования определены коэффициенты гармонических искажений и коэффициенты несимметрии по обратной и нулевой последовательности. Выявлено, что использование блока памяти с хранением эталонной формы напряжения в составе системы управления позволяет в достаточной мере снизить гармонические искажения напряжения и небаланс фазных напряжений на выходе корректора напряжения. Однако установлено, что применение корректора напряжения приводит к искажению напряжения со стороны генераторного агрегата, а также незначительно повышает несимметрию напряжения по обратной последовательности в случае активной нагрузки. Результаты исследования показывают практическую возможность реализации корректора напряжения в составе судовой электроэнергетической системы с ограниченной мощностью генераторного агрегата.

Ключевые слова: вольтодобавочный трансформатор, судовая электроэнергетическая сеть, корректор напряжения, гармонические искажения, несимметрия.

Для цитирования:
Сугаков В. Г. Вольтодобавочный корректор напряжения с использованием эталонной формы напряжения / В. Г. Сугаков, Н. С. Варламов, Ю. С. Малышев // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2018. — Т. 10. — № 6. — С. 1264–1276. DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-6-1264-1276.

Введение (Introduction)

В судовых системах электроснабжения использование полупроводниковых преобразователей электрической энергии, мощность которых соизмерима с мощностью судовой электрической станции, при несимметричном распределении мощности электропотребителей различного типа оказывает негативное воздействие на качество электрической энергии. Появление напряжений и токов обратной и нулевой последовательности, возникающих в трехфазной системе, приводит к дополнительным потерям мощности и напряжения в трехфазной системе электроснабжения, а также оказывает отрицательное влияние на работу различных исполнительных механизмов [1]–[3]. Гармонические искажения приводят к дополненным потерям в статорных обмотках синхронных генераторов, сбоям в работе радиоэлектронного оборудования, ухудшению условий коммутации полупроводниковых ключей, образованию дополнительных диэлектрических потерь, снижению класса точности устройств защиты и контрольно-измерительных приборов, а также появлению других негативных эффектов [1], [4], [5].

Согласно [6]–[8], значения суммарных коэффициентов гармонических составляющих напряжения электрической сети 380 В, усредненные в интервале времени 10 мин, не должны превышать значения 8 % в течение 95 % времени интервала за одну неделю и 12 % в течение 100 % времени интервала за одну неделю. Для значений коэффициентов несимметрии напряжений в трехфазных системах электроснабжения по обратной и нулевой последовательности в точке передачи электрической энергии не должны превышать 2 % и 4 % в течение 95 % и 100 % времени интервала за одну неделю соответственно.

Обеспечение удовлетворительного качества электрической энергии возможно только при проведении комплекса мероприятий, состоящих из оптимальных схемных решений и выбора способа управления полупроводниковым преобразователем, обеспечивающих минимизацию гармоник. К системным решениям относятся: коррекция структуры судовой системы электроснабжения, включение фильтрокомпенсирующих устройств, применение в системах автоматического регулирования напряжения корректоров напряжения и систем регулирования возбуждения синхронных генераторов с внешней форсировкой [9]. В качестве средств индивидуальной защиты отдельных потребителей могут быть использованы широкополосные фильтры. Однако в настоящее время наиболее перспективным является использование активных фильтров и вольтодобавочных компенсаторов.

Устройства, в основу которых входят вольтодобавочные трансформаторы (ВДТ), нашли широкое применение в системах компенсации небаланса фазных напряжений [10], в энергосберегающих асинхронных электроприводах [11], а также в системах коррекции гармонических искажений, вызванных работой мощных полупроводниковых приборов [12]–[14]. Недостатком схемных решений при компенсации небаланса фазных напряжений является невозможность сохранения

удовлетворительного коэффициента небаланса фазных напряжений при работе на переменную неоднородную нагрузку. В связи с этим предложен корректор напряжения [15], который за счет одновременного приближения формы кривой напряжения к идеальной синусоиде устраняет дисбаланс фазных напряжений.

Методы и материалы (Methods and Materials)

Корректор напряжения (КН) состоит из вольтодобавочного трансформатора, вторичная обмотка которого включается последовательно в цепь генераторного агрегата для регулирования и стабилизации напряжения в цепи нагрузки. Первичная обмотка КН питается от регулируемого источника напряжения вольтодобавки. Принцип работы КН заключается в формировании и передаче в систему электроснабжения напряжения вольтодобавки, которое находится в противофазе с высшими гармониками напряжения сети. На рис. 1 представлена структурная схема судовой электроэнергетической системы с корректором напряжения на основе вольтодобавочных трансформаторов T_1–T_3, включенным между генератором G с системой автоматического регулирования напряжения, нелинейной и линейной нагрузкой и несимметричной нелинейной и линейной нагрузкой. Система управления (СУ) на основе измерения напряжения каждой из фаз сети U_{L1}, U_{L2}, U_{L3} формирует напряжение вольтодобавки для каждой из фаз напряжения сети.

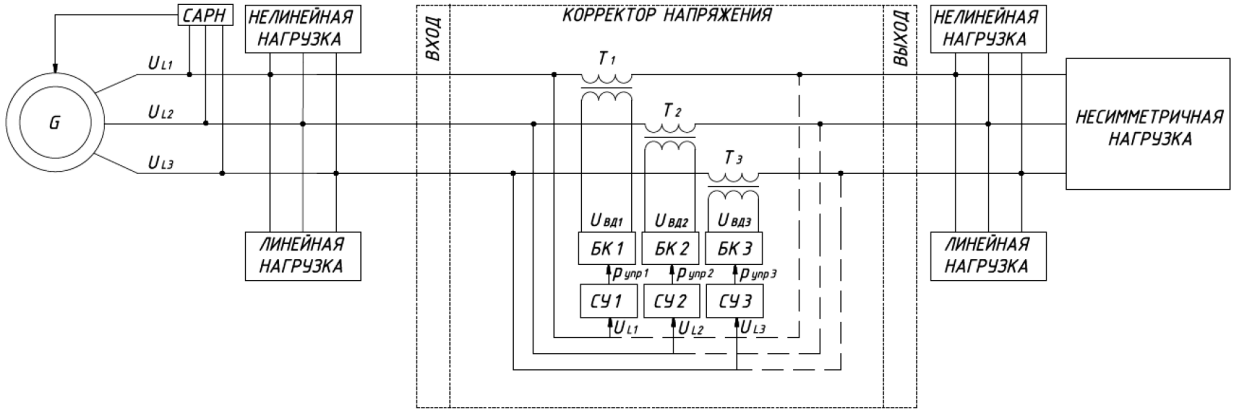


Рис. 1. Структурная схема судовой электроэнергетической системы с корректором напряжения

Для исследования эффективности компенсации гармонических искажений и небаланса фазных напряжений была разработана модель судовой электроэнергетической системы с КН в программном пакете MATLAB (номер лицензии 530479). Общий вид модели представлен на рис. 2.

В качестве генератора *G* (см. рис. 1) используется синхронный явнополюсный генератор мощностью 60 кВ·А с номинальным напряжением 400 В и частотой напряжения 50 Гц, который представлен блоком *Simplified Synchronous Machine pu Units*. Частота вращения задается с помощью блока *w* в относительных единицах. Система возбуждения генератора представлена блоком *Excitation System*, на вход которого подается требуемая величина выходного напряжения генератора с выхода блока *Vref* в относительных единицах, и элементами *Three – PhaseV – IMeasurement1*, *wt* и *B*1 (блок *Abctodq0*), выполняющими переход от системы координат *abc* к системе *dq*0. Блоки *LLoad*1, *LLoad*2 и *LLoad*3 являются линейными нагрузками генератора *G*. Блоки *NLoad*1 и *NLoad*2, состоящие из активной нагрузки *Load*1 и *Load*2 и неуправляемых выпрямителей *VSD*1 и *VSD*2, являются нелинейной нагрузкой. Блок *NSLoad*1 является несимметричной нагрузкой для генератора. Подключение несимметричной нагрузки *NSLoad*1 осуществляется с помощью блоков *Three – Phase – Breake* и *Start*2.

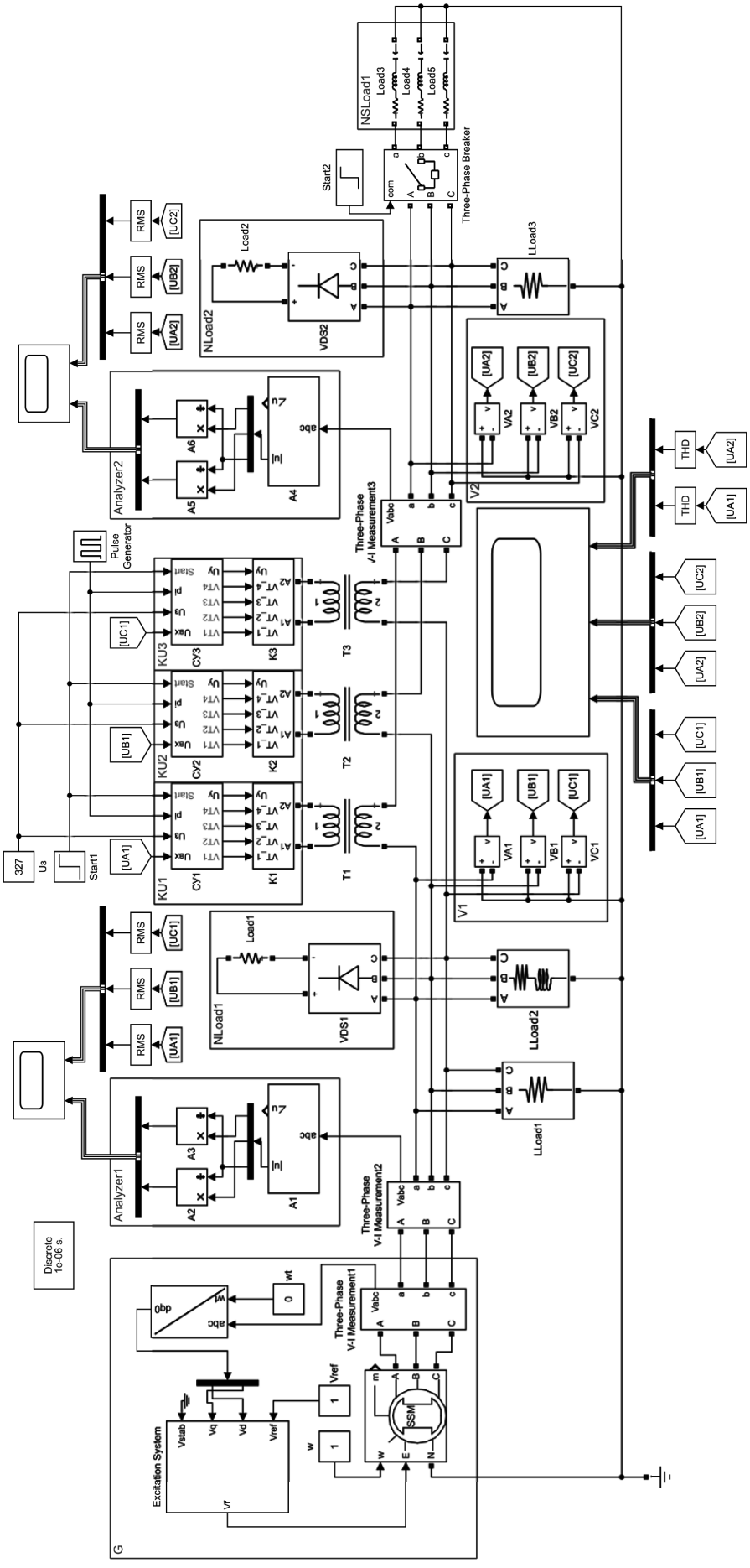


Рис. 2. Имитационная модель корректора напряжения

Каждая группа вольтметров *V*1 (*VA*1, *VB*1 и *VC*1) и *V*2 (*VA*2, *VB*2 и *VC*2) состоит из трех вольтметров, представленных блоками *Voltage Measurement*, которые измеряют напряжения в точках подключения нагрузок к клеммам генератора и в точках подключения нагрузок к клеммам КН соответственно. Блок *THD* выполняет расчет коэффициента гармонических искажений. Блок *RMS* измеряет среднеквадратичное значение напряжения. Блоки *Three – PhaseV – IMeasurement*2, *Three – PhaseV – IMeasurement*3, *Analyzer*1 и *Analyzer*2 (элементы *A*1–*A*6) служат для расчета коэффициентов несимметрии напряжения по нулевой и обратной последовательности в относительных единицах.

Корректор напряжения представлен тремя вольтодобавочными трансформаторами *T*1–*T*3, системами управления *СУ*1–*СУ*3 и силовыми блоками коммутации *K*1–*K*3. На вход каждой системы управления КН подаются: сигнал запуска с выхода блока *Start*, заданная амплитуда напряжения с выхода блока *U*з, импульсы стабильной частоты с выхода генератора импульсов *Pulse Generator* и напряжение с выхода соответствующего вольтметра группы *V*1 или *V*2.

Имитационная модель системы управления для одной фазы сетевого напряжения представлена на рис. 3. Напряжение синусоидальной формы первой фазы поступает с первого входа блока системы управления через элемент задержки *0* на элемент модуля числа *1*, с выхода которого пульсирующий сигнал поступает на формирователь коротких импульсов *3*, образованный элементами *3.1–3.3*, через формирователь прямоугольных импульсов *2*. По фронту прямоугольного сигнала с выхода элемента *2* формирователь *3* генерирует короткие импульсы, длительность которых задается элементом *3.1* и составляет половину периода следования импульсов с задающего генератора частоты. Таким образом, элементы *1–3* и их связи организовывают моменты формирования измерения полупериода сетевого напряжения.

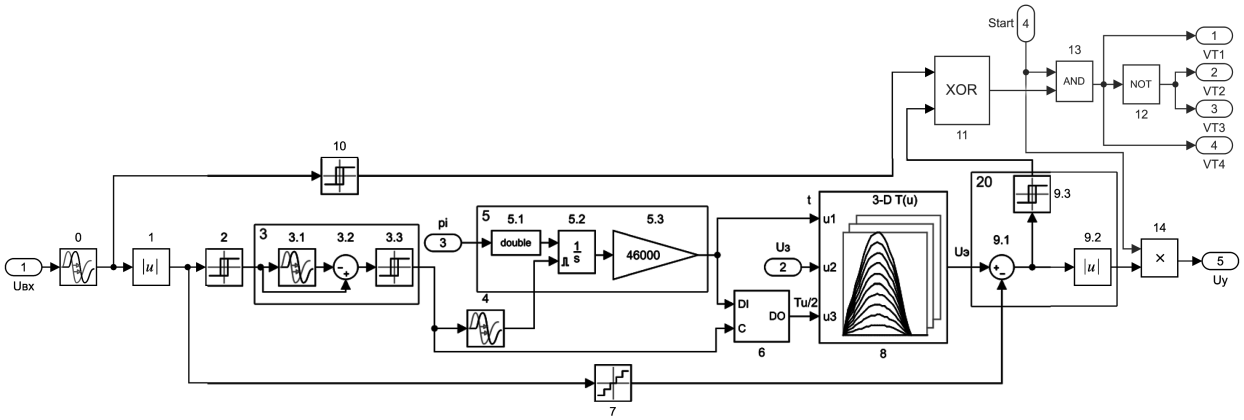


Рис. 3. Блок-схема имитационной модели системы управления корректором напряжения

Измерение текущего времени *t* осуществляет суммирующий счетчик *5*, сформированный элементами *5.1–5.3*. На счетный вход элемента *5.2* поступают через третий вход системы управления импульсы стабильной частоты с выхода генератора импульсов. На выходе элемента *5.3* появляется линейно-нарастающий сигнал, значение которого соответствует текущему времени *t*. При этом каждую половину периода сетевого напряжения происходит сброс счетчика *5* через элемент задержки *4* импульсом с выхода формирователя коротких импульсов *3*. Задержка импульса происходит в течение периода следования импульсов с выхода генератора *Pulse Generator*.

Формирование значения числа *Tu/2*, соответствующее половине периода напряжения, осуществляет регистр памяти *6* (рис. 4, *а*), который состоит из элементов *6.2*, *6.3* и подсистемы *6.1* (рис. 4, *б*). По окончании подсчета полупериода, с приходом очередной полуволны сетевого напряжения, по фронту импульса с выхода формирователя *3* в регистр записывается текущее значение сигнала с выхода суммирующего счетчика *5*.

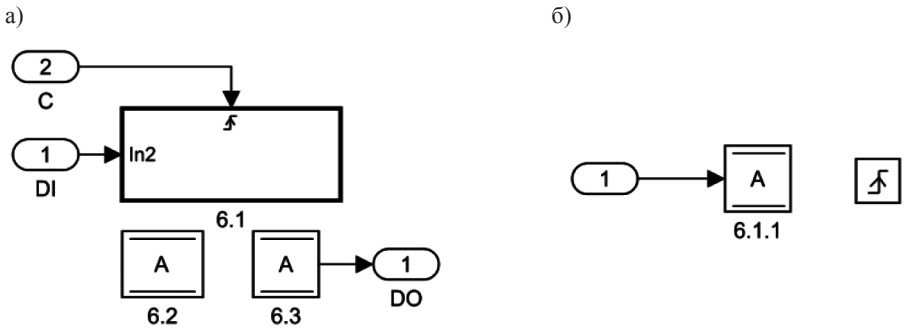


Рис. 4. Блок-схема регистра памяти:
а — подсистема *6*; *б* — подсистема *6.1*

Блок памяти *8* представлен в виде *Lookup Table* (*3–d*). В ячейках блока памяти записаны значения эталонного напряжения с эталонной синусоидальной формой напряжения (рис. 5). В зависимости от текущего времени *t*, амплитуды задающего напряжения *U*з, поступающего через второй вход системы управления, и полупериода сетевого напряжения *T/2* на выходе блока памяти *8* появляется значение эталонного напряжения.

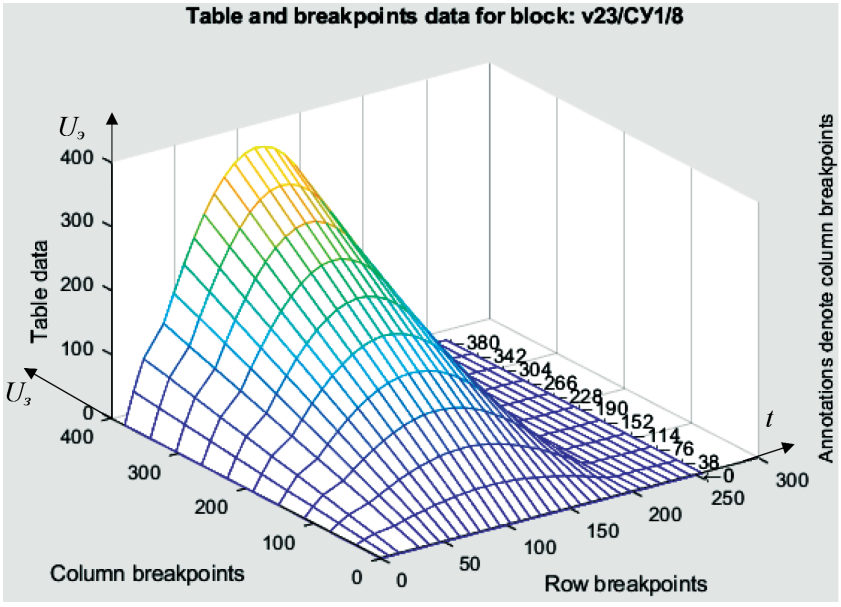


Рис. 5. Область формирования эталонной формы синусоидального напряжения
в блоке памяти системы управления корректором напряжения

Из элементов *9.1*, *9.2* и *9.3* собран вычитающий счетчик *9*, формирующий отклонение мгновенного напряжения первой фазы, поступающего через элемент *7* дискретизации на отрицательный вход элемента *9.1*, от эталонного напряжения, задаваемого блоком памяти *8* и поступающего на положительный вход элемента *9.1*. Отклонение мгновенного напряжения с выхода вычитающего счетчика *9* поступает на коммутатор через элемент блокировки *14*. При положительном значении отклонения мгновенного напряжения от эталонного элемент *9.3* формирует импульс управления электронными ключами.

Выбор моментов коммутации электронных ключей и определение полярности вольтодобавки обеспечивают: логический элемент, исключающий *ИЛИ11*, логический элемент *И12*, формирователь прямоугольных импульсов при прохождении положительной полуволне напряжения *10* и элемент *9.3* вычитающего счетчика *9*. Элементы *13* и *14* блокируют коммутацию электронных ключей и формирование вольтодобавки при отсутствии сигнала на входе *4* системы управления.

Блок коммутации, представленный на рис. 6, содержит четыре электронных ключа *VT1–VT4* на базе IGBT-транзисторов со встречно-параллельным диодом и источник вольтодобавки *Voltage Source*.

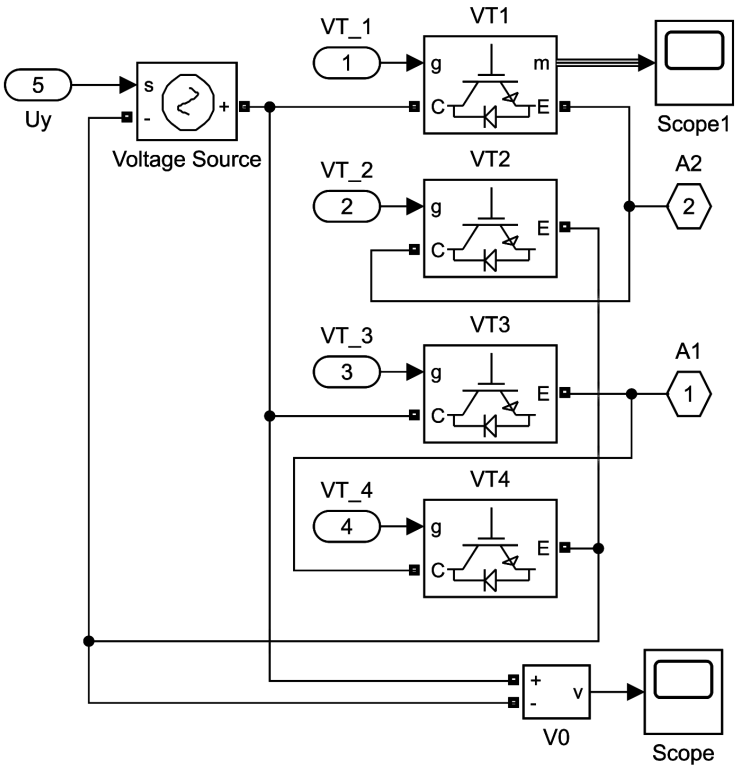


Рис. 6. Блок-схема блока коммутации корректора напряжения

Управляющие импульсы с выхода системы управления поступают на затвор электронных ключей *VT1–VT4*. При этом коллекторы транзисторов *VT1* и *VT3* соединены с положительным полюсом элемента *Voltage Source*, а эмиттеры транзисторов *VT2* и *VT4* — с отрицательным полюсом. Эмиттеры транзисторов *VT1* и *VT3* и коллекторы транзисторов *VT2* и *VT4* соединены с первичной обмоткой соответствующего вольтодобавочного трансформатора.

Результаты (Results)

Для оценки эффективности применения корректора напряжения проведено исследование работы модели (см. рис. 2). На рис. 7 представлены результаты моделирования работы корректора напряжения. Мощности линейных нагрузок *LLoad*1, *LLoad*2 и *LLoad*3 принимались равными 5 кВт, 5 кВ·А (активно-индуктивный характер) и 5 кВт соответственно, мощность нелинейной нагрузки *NLoad1* — 20 кВт. При этом мощности нагрузок *Load*3, *Load*4, *Load*5 принимались равными 6,7 кВ·А (активно-индуктивный характер), 4,24 кВ·А (активно-емкостной характер) и 6 кВт соответственно.

С момента включения генератора в диапазоне времени 0–0,5 с за счет нелинейной нагрузки соизмеримой мощности напряжение сети значительно искажается, а установившаяся величина нелинейных искажений достигает 14,4 % в точке присоединения генератора и 13,6 % в точке присоединения корректора напряжения. Вследствие симметрии нагрузок в данный период времени коэффициенты несимметрии по нулевой K_{0U}- и обратной K_{2U}-последовательности стремятся к нулевому значению. При этом фазные напряжения на выходе корректора напряжения остаются равными.

В момент времени 0,25 с подключается несимметричная нагрузка. В период времени 0,25–0,5, когда установившееся значение нелинейных искажений уменьшается до 15,1 % в точке

присоединения генератора и до 14,2 % на выходе корректора напряжения, а коэффициенты несимметрии по обратной и нулевой последовательности увеличиваются до 0,0376 и 0,02085 соответственно, также наблюдается небаланс фазных напряжений на выходе генератора.

В период времени 0,5 (когда вводится в работу КН)–0,7 с установившееся значение коэффициента нелинейных искажений на выходе корректора напряжения достигает 3 %, а также наблюдается незначительное уменьшение установившегося значения коэффициента нелинейных искажений до 14,54 % в точке присоединения генератора, уменьшение коэффициента несимметрии по нулевой последовательности до 0,01 и коэффициента несимметрии по обратной последовательности до 0,0345 в точке присоединения корректора напряжения.

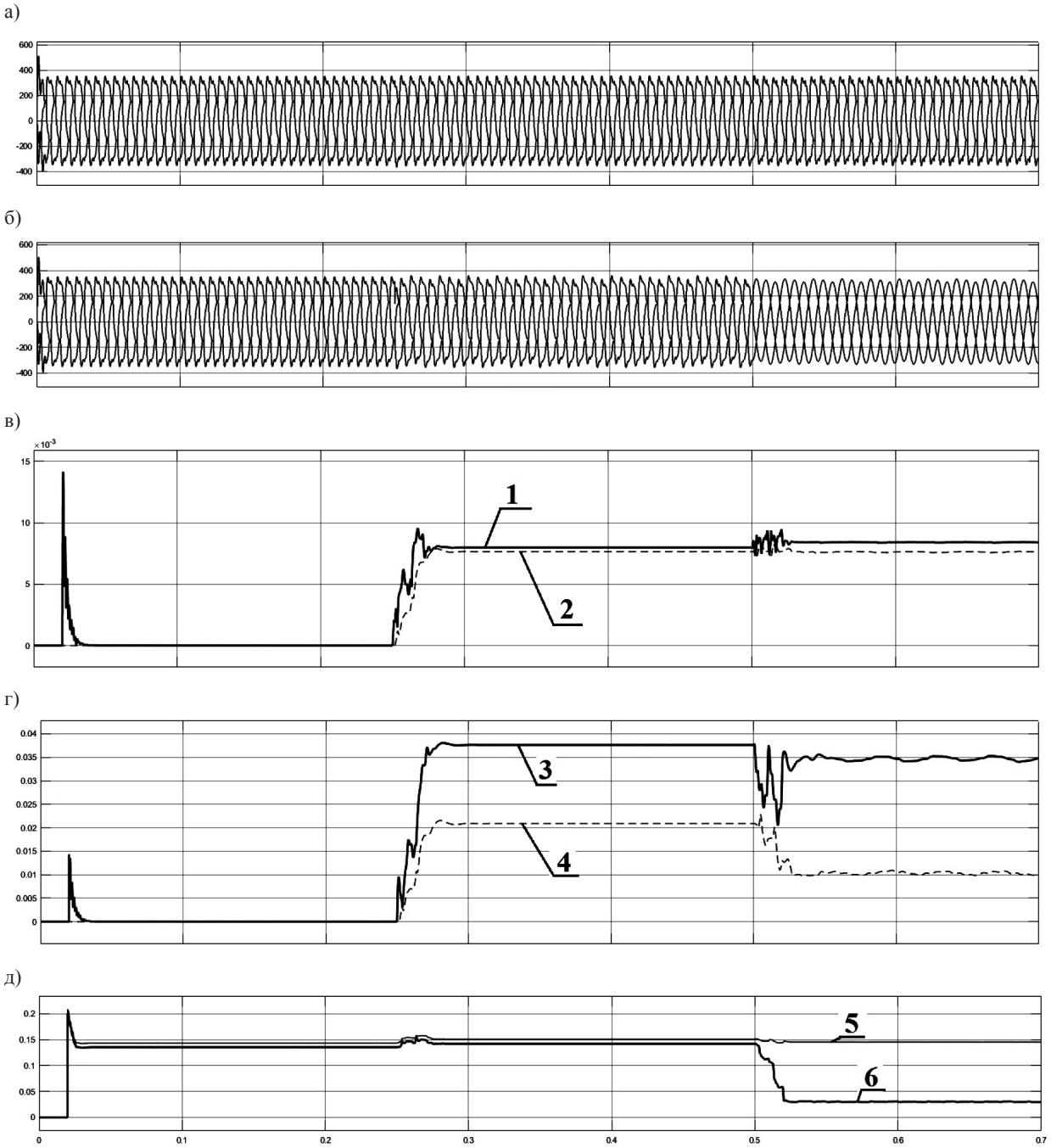
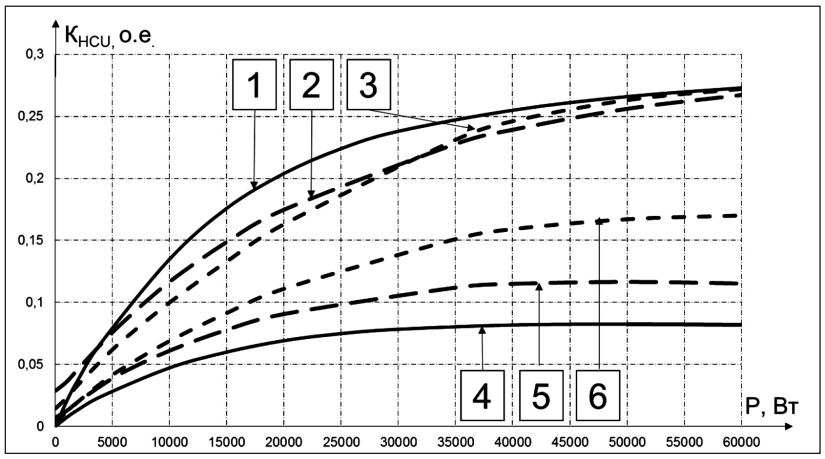


Рис. 7. Результаты моделирования работы корректора напряжения:
а — фазные напряжения на входе КН; *б* — фазные напряжения на выходе КН;
в — изменение коэффициентов нулевой *2* и обратной *1* последовательности на входе КН;
г — изменение коэффициентов нулевой *4* и обратной *3* последовательности на КН;
д — коэффициенты нелинейных искажений на входе *5* и на выходе КН *6*

С помощью модели было исследовано влияние изменения мощности нелинейной нагрузки на величину коэффициента искажения на шинах генератора и на выходе корректора напряжения. Результаты моделирования представлены на рис. 8, где показано изменение коэффициента нелинейных искажений в судовой электроэнергетической системе без и с использованием коррекции напряжения в зависимости от мощности нелинейных нагрузок *NLoad*1 или *NLoad*2, а также при подаче на вход системы управления КН напряжений с входа / выхода вольтодобавочного трансформатора. При этом мощность нагрузок *LLoad*1, *LLoad*2, *LLoad*3 равнялась 5 кВт, 5 кВ·А и 5 кВт, а мощность нагрузок *Load*3, *Load*4, *Load*5 принималась равной 6 кВт.

а)



б)

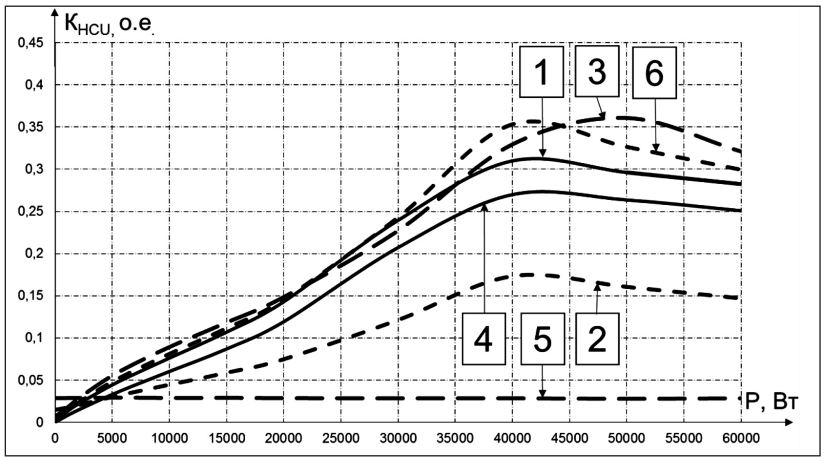


Рис. 8. График влияния мощности нелинейной нагрузки на коэффициент нелинейных искажений:
а — при изменении мощности нелинейной нагрузки *NLoad*2; *б* — при изменении мощности нелинейной нагрузки *NLoad*1; *1* — на выходе КН без использования коррекции напряжения;
2 — на выходе КН с коррекцией напряжения в зависимости от напряжений на входе ВДТ;
3 — на выходе КН с коррекцией напряжения в зависимости от напряжений на выходе ВДТ;
4 — на входе КН без использования коррекции напряжения;
5 — на входе КН с коррекцией напряжения в зависимости от напряжений на входе ВДТ;
6 — на входе КН с коррекцией напряжения в зависимости от напряжений на выходе ВДТ

Анализ графиков показывает, что наибольшая эффективность по уменьшению гармонических искажений достигается при подаче на вход системы управления КН напряжений со стороны источника гармонических искажения, при этом наилучшие показатели (около 3 %) КН показывает при возникновении гармоник со стороны входа ВДТ (см. рис. 8, *б*, характеристика *5*). Во всех случаях наблюдается уменьшение коэффициента гармонических искажения на выходе КН и увеличение данного коэффициента на стороне генератора. Степень уменьшения гармонических ис-

кажений в основном зависит от мощности нелинейной нагрузки, точности задания эталонного напряжения в блоке памяти и задержки формирования напряжения вольтодобавки.

Исследовано влияние изменения мощности однофазной нагрузки *Load3* (мощность нагрузок *Load*4, *Load*5 принималась равной 6 кВт в случае активной нагрузки, 3 кВт при активной составляющей и 3 кВ·А при реактивной составляющей в случаях активно-индуктивного и активно-емкостного характера нагрузки) на величину изменения коэффициентов несимметрии по нулевой K_{0U}- и обратной K_{2U}-последовательности (рис. 9).

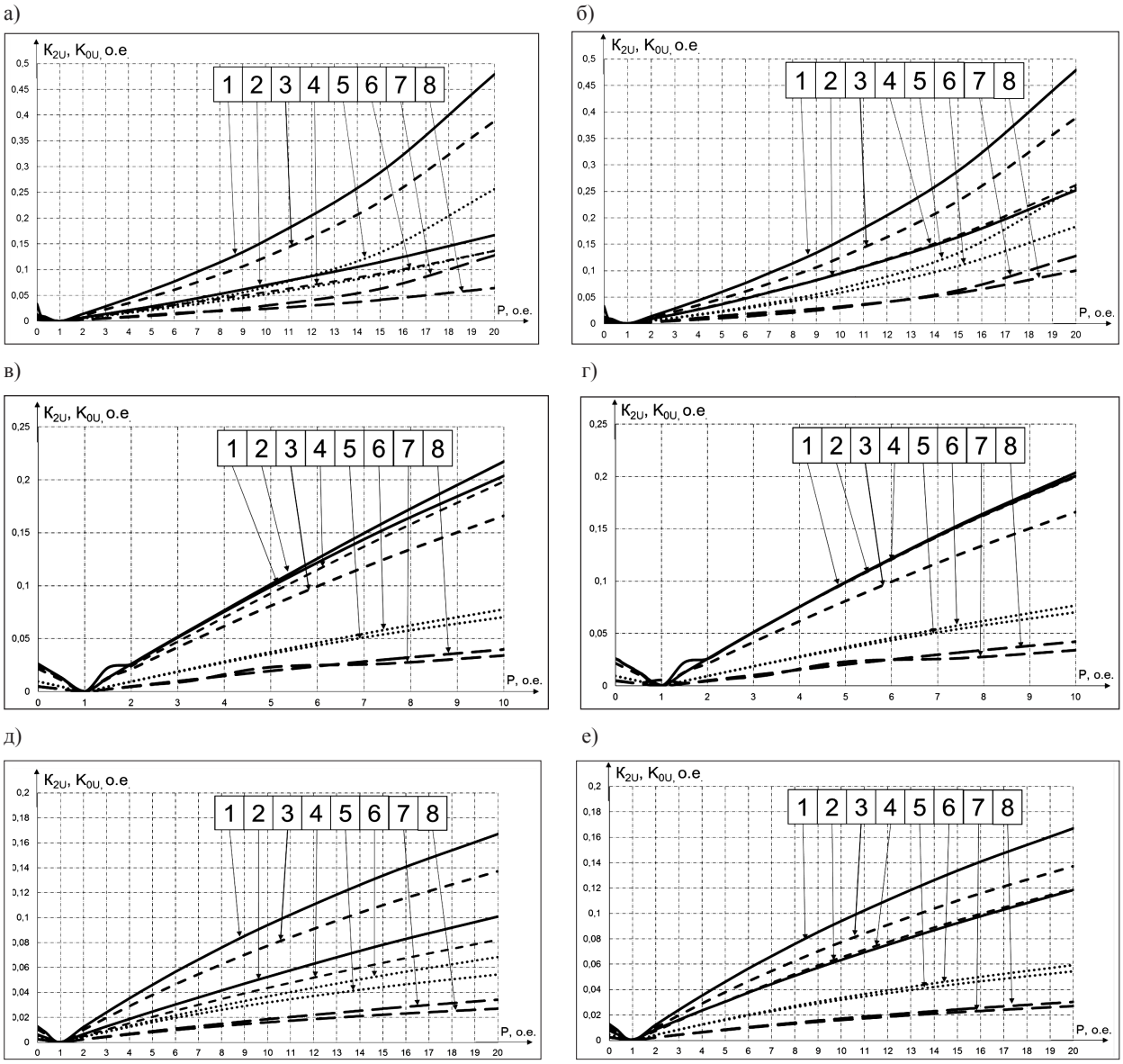


Рис. 9. Графики изменения коэффициентов несимметрии по нулевой и обратной последовательности в зависимости от относительной мощности нагрузок одной фазы: *а*, *б* — при изменении мощности емкостной составляющей нагрузки в зависимости от напряжений с входа и выхода КН соответственно; *в*, *г* — при изменении мощности активной составляющей нагрузки в зависимости от напряжений с входа и выхода КН соответственно; *д*, *е* — при изменении мощности индуктивной составляющей нагрузки в зависимости от напряжений с входа и выхода КН соответственно

Условные обозначения:

1 — коэффициент K_{0U} на выходе КН без коррекции напряжения; *2* — коэффициент K_{0U} на выходе КН с коррекцией напряжения; *3* — коэффициент K_{2U} на выходе КН без коррекции напряжения; *4* — коэффициент K_{2U} на выходе КН с коррекцией напряжения; *5* — коэффициент K_{0U} на входе КН без коррекции напряжения; *6* — коэффициент K_{0U} на входе КН с коррекцией напряжения; *7* — коэффициент K_{2U} на входе КН без коррекции напряжения; *8* — коэффициент K_{2U} на входе КН с коррекцией напряжения

Характеристики, полученные на имитационной модели корректора напряжения, позволяют выполнить качественный анализ работы КН при различном характере несимметричной нагрузки и типе управления КН.

Из рис. 9, *а*, *б*, *д*, *е* видно, что при емкостном и индуктивном характере нагрузки коэффициенты K_{0U} и K_{2U} уменьшаются на входе и выходе КН при увеличении мощности нагрузки одной из фаз. Использование напряжений с выхода КН в качестве входных для системы управления КН позволяет значительно снизить коэффициенты несимметрии по нулевой и обратной последовательности.

При работе КН на активную нагрузку (см. рис. 9, *в*, *г*) наблюдается негативное влияние на качество электрической энергии, в результате чего происходит увеличение коэффициентов несимметрии по нулевой и обратной последовательности как со стороны выхода ВДТ, так и со стороны генератора.

Анализ графиков показывает, что режим стабилизации фазных напряжений обеспечивает снижение коэффициента небаланса фазных напряжений и несимметрии нулевой последовательности в случае активно-реактивного характера несимметричной нагрузки. Наибольшая эффективность КН достигается при подаче напряжений выходных напряжений КН на вход его системы управления, однако такой способ не позволяет в должной мере устранить гармонические искажения, вызванные нелинейными потребителями электрической энергии со стороны генератора. С другой стороны, использование фазных напряжений со стороны генератора в качестве входных для корректора напряжения позволяет приблизить форму кривой напряжения на выходе КН к эталонной в случае гармонических искажений со стороны входа КН, которая ограничивается только формой задания эталонного напряжения и задержкой входного сигнала в системе управления.

Выводы (Conclusion)

В результате проведения эксперимента можно сделать следующие выводы:

1. Технический результат предлагаемого корректора напряжения заключается в расширении функциональных возможностей системы управления вольтодобавочным трансформатором, в результате чего работа КН в составе судовой электроэнергетической системы позволяет снизить гармонические искажения и небаланс фазных напряжений. При этом уровень качества напряжения с выхода вольтодобавочного трансформатора в основном определяется формой задания эталонного напряжения в блоке памяти устройства.

2. Анализ данных показывает, что наибольшая эффективность по уменьшению гармонических искажений предложенного устройства достигается в случае, когда источник гармонических искажений в цепи генератора располагается перед корректором в случае, когда на вход системы управления КН подается напряжение с шин генератора.

3. При несимметрии реактивной мощности потребителей электрической энергии данное устройство позволяет существенно снизить величину небаланса напряжений по обратной и нулевой последовательности в случае, когда данные потребители располагаются после корректора напряжения при коррекции напряжения в зависимости от напряжения с шин несимметричной нагрузки.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Fuchs E.* Power Quality in Power Systems and Electrical Machines / E. Fuchs, M. A. S. Masoum. — Second edition. — Academic Press, 2015. — 1140 p. DOI: 10.1016/B978-0-12-800782-2.09989-9.

2. *Абдиева З. Э.* Экспериментальное исследование несимметрии трехфазной системы напряжений / З. Э. Абдиева, Б. И. Сариев, Р. Б. Куржумбаева, Х. Т. Касмамбетов // Научно-технический вестник Брянского государственного университета. — 2018. — № 2. — С. 93–100. DOI: 10.22281/2413-9920-2018-04-02-218-225.

3. *Виноградов А. А.* Анализ влияния непропорционального распределения нагрузки между параллельно работающими генераторами на коэффициент мощности нагрузки каждого генератора / А. А. Вино-

градов // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2018. — Т. 10. — № 2. — С. 411–419. DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-2-411-419.

4. *Ольховский В. Я.* Исследование воздействия высших гармоник мелких нелинейных потребителей на работу сети до 1000 В / В. Я. Ольховский, Т. В. Мятеж, С. Ю. Наяксов // Доклады академии наук высшей школы Российской Федерации. — 2016. — № 1 (30). — С. 84–97. DOI: 10.17212/1727-2769-2016-1-84-97.

5. *Родимов Н. В.* Анализ систем повышения качества электрической энергии при активной фильтрации гармонических искажений сети / Н. В. Родимов // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2015. — № 2 (30). — С. 198–207. DOI: 10.21821/2309-5180-2015-7-2-198-207.

6. ГОСТ 32144-2013. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. — М.: Стандартинформ, 2014. — 6 с.

7. Правила Российского Речного Регистра: в 5 т. — М.: Российский речной регистр, 2017. — Т. 2: Правила классификации и постройки судов (ПКПС). — 1885 с.

8. Правила классификации и постройки морских судов Российского морского регистра судоходства. Ч. XI: Электрическое оборудование. — СПб: Российский морской регистр судоходства, 2018. — 131 с.

9. *Сугаков В. Г.* Внешняя форсировка систем возбуждения судовых синхронных генераторов / В. Г. Сугаков [и др.] // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Морская техника и технология. — 2015. — № 3. — С. 103–111.

10. *Сугаков В. Г.* Компенсация небаланса фазных напряжений / В. Г. Сугаков, О. С. Хватов, Ю. С. Малышев, А. А. Тощев // Вестник Ивановского государственного энергетического университета. — 2015. — № 2. — С. 30–34. DOI: 10.17588/2072-2672.2015.2.030.034.

11. *Старостина Я. К.* Построение ряда энергосберегающих асинхронных электроприводов на основе унифицированного трансформаторно-транзисторного модуля / Я. К. Старостина, С. Н. Сидоров // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Энергетика. — 2017. — Т. 17. — № 2. — С. 67–74. DOI: 10.14529/power170209.

12. *Коробко Г. И.* Моделирование устройства компенсации нелинейных искажений напряжения судовой электроэнергетической системы / Г.И. Коробко, В.В. Лебедев // Вестник Ивановского государственного энергетического университета. — 2014. — № 2. — С. 45–49.

13. *Мещеряков В. Н.* Устройство компенсации гармонических искажений тока в системах с тиристорным преобразователем напряжения / В. Н. Мещеряков, А. М. Евсеев // Электротехнические системы и комплексы. — 2017. — № 3 (36). — С. 4–10. DOI: 10.18503/2311-8318-2017-3(36)-4-10.

14. *Мещеряков В. Н.* Исследование активного фильтро-компенсирующего устройства с общим звеном постоянного тока / В. Н. Мещеряков, М. М. Хабибуллин, И. С. Павлов // Вестник Ивановского государственного энергетического университета. — 2016. — № 1. — С. 44–51. DOI: 10.17588/2072-2672.2016.1.044-051.

15. Пат. 2612055, Российская Федерация, МПК H02P 9/14. Корректор напряжения / В. Г. Сугаков, Ю. С. Малышев, О. С. Хватов, Н. С. Варламов, И. И. Ягжов; заяв. и патентообл. ФГБОУ ВО «Волжский государственный университет водного транспорта». — № 2631862; Заявлено 27.10.2016; Опубл. 27.09.2017; бюл. № 27. — 10 с.

REFERENCES

1. Fuchs, Ewald, and Mohammad AS Masoum. *Power Quality in Power Systems and Electrical Machines.* Second edition. Academic Press, 2015. DOI: 10.1016/B978-0-12-800782-2.09989-9.

2. Abdieva, Z. E., B. I. Sariev, R.B. Kurzhumbaeva, and K. T. Kasmambetov. “Experimental study of the asymmetry of a three-phase stress system.” *Scientific and Technical Journal of Bryansk State University* 2 (2018): 93–100. DOI: 10.22281/2413-9920-2018-04-02-218-225.

3. Vinogradov, Andrey A. “Analysis of influence of non-proportional distribution of load between parallelly operating generators for the power factor of loading of each generator.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova* 10.2 (2018): 411–419. DOI: 10.21821/2309-5180- 2018-10-2-411-419.

4. Olhovskiy, V. Y., T. V. Myateg, and S. Y. Nayaksov. “Predictions of Circuit High Harmonics Values Increase in the Networks of up to 1000 V.” *Proceedings of the Russian Higher School Academy of Sciences* 1(30) (2016): 84–97. DOI: 10.17212/1727-2769-2016-1-84-97.

5. Rodimov, N.V. "Analysis of improving the quality of electrical energy at active filtering of harmonic distortion of network." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova* 2(30) (2015): 198–207. DOI: 10.21821/2309-5180-2015-7-2-198-207.

6. Russian Federation. State Standard GOST 32144-2013. Electric energy. Electromagnetic compatibility of technical equipment. Power quality limits in the public power supply systems. M.: Standartinform, 2014.

7. *Pravila Rossiiskogo Rechnogo Registra: v 5 t. Vol. 2. Pravila klassifikatsii i postroiki sudov (PKPS).* M.: Rossiiskii rechnoi registr, 2017.

8. *Pravila klassifikatsii i postroiki morskikh sudov Rossiiskogo morskogo registra sudokhodstva. Chast' XI. Elektricheskoe oborudovanie*. SPb: Rossiiskii morskoi registr sudokhodstva, 2018.

9. Sugakov, Valeriy Gennadyevich, Oleg Stanislavovich Khvatov, Yuriy Sergeevich Malyshev, Alexander Aleksandrovich Toshchev, and Ivan Vyacheslavovich Sychushkin. "External boost of excitation systems of marine synchronous generators." *Vestnik of Astrakhan State Technical University. Series: Marine Engineering and Technologies* 3 (2015): 103–111.

10. Sugakov, V. G., O. S. Khvatov, Y. S. Malyshev, and A. A. Toshchev. "Compensation of phase voltage unbalance." *Vestnik IGEU* 2 (2015): 30–34. DOI: 10.17588/2072-2672..2.030-034.

11. Starostina, Ya. K., and S. N. Sidorov. "Construction of a number of energy saving asynchronous electric drives based on unified transformer-transistor module." *Bulletin of South Ural State University. Series "Power Engineering"* 17.2 (2017): 67–74. DOI: 10.14529/power170209.

12. Korobko, G. I., and V. V. Lebedev. "Simulating of a nonlinear voltage distortion compensation device of a ship electric power system." *Vestnik IGEU* 2 (2014): 45–49.

13. Meshcheryakov, Victor N., and Alexei M. Evseev. "Device For Compensation of Harmonic Distortion of Currents in Systems with a Tyristor Voltage Converter." *Electrotechnical Systems and Complexes* 3(36) (2017): 4–10. DOI: 10.18503/2311-8318-2017-3(36)-4-10.

14. Meshcheryakov, V. N., M. M. Khabibullin, and I. S. Pavlov. "A study of the active filter-compensation device with a common DC link." *Vestnik IGEU* 1 (2016): 44–51. DOI: 10.17588/2072-2672.2016.1.044-051.

15. Sugakov, V. G., Yu. S. Malyshev, O. S. Khvatov, N. S. Varlamov, and I. I. Yagzhov. RU 2612055, IPC H 02 P 9/14. Korrektor napryazheniya. Russian Federation, assignee. Publ. 27 Sept. 2017.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Сугаков Валерий Геннадьевич —
доктор технических наук, профессор
ФГБОУ ВО «Волжский государственный университет водного транспорта»
603951, Российская Федерация, Нижний Новгород, ул. Нестерова, 5
e-mail: *elektrikasp@mail.ru, electrotech@vgavt-nn.ru*

Варламов Никита Сергеевич — аспирант
Научный руководитель:
Сугаков Валерий Геннадьевич
ФГБОУ ВО «Волжский государственный университет водного транспорта»
603951, Российская Федерация, Нижний Новгород, ул. Нестерова, 5
e-mail: *varlamov_nikita@mail.ru*

Малышев Юрий Сергеевич —
кандидат технических наук, доцент
ФГБОУ ВО «Волжский государственный университет водного транспорта»
603951, Российская Федерация, Нижний Новгород, ул. Нестерова, 5
e-mail: *elektrikasp@mail.ru*

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Sugakov, Valerij G. —
Dr. of Technical Sciences, professor
Volga State University of Water Transport
5 Nesterova Str., Nizhny Novgorod, 603951, Russian Federation
e-mail: *elektrikasp@mail.ru, electrotech@vgavt-nn.ru*

Varlamov, Nikita S. — Postgraduate
Supervisor:
Sugakov, Valerij G.
Volga State University of Water Transport
5 Nesterova Str., Nizhny Novgorod, 603951, Russian Federation
e-mail: *varlamov_nikita@mail.ru*

Malyshev, Yury S. —
PhD, associate professor
Volga State University of Water Transport
5 Nesterova Str., Nizhny Novgorod, 603951, Russian Federation
e-mail: *elektrikasp@mail.ru*

Статья поступила в редакцию 11 декабря 2018 г.
Received: December 11, 2018.

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

DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-6-1277-1287

SELECTION AND JUSTIFICATION OF THE DESIGN ELECTRIC POWER SYSTEMS OF DEEP WATER UNDERWATER APPARATUS

V. V. Romanovsky, B. V. Nikiforov, A. M. Makarov

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

The article discusses deep-water apparatus designed for an immersion depth from 2,000 to 6,000 m, its design characteristics and layout of the main parts. The apparatus have contours close to the body of rotation with a horizontal axis. In order to simplify the systems and reduce their cost, electric drives are introduced as widely as possible, the hydraulic system is minimized. Electrical power system of direct current, providing electricity to all consumers of the apparatus is considered. As a power source have proposed lithium-ion batteries, which are currently at an early stage of development, but with high potential for improvement. The propulsion complex consists from switched reluctance drives and the backup version is electric motors with permanent magnets on the rotor. For the first have shown the main ways of controlling the movement of the apparatus: changing the rotational speed of the sustainer electric motors, including their work "at odds", as well as the use of rudders or rotary profiled grids installed in the jet of each sustainer motors. The light sources for exterior and interior lighting with built-in LEDs are preferred and promising as light sources, and their advantages as compared to lamps with traditional lamps are shown. The main characteristics of the outdoor lighting system, photo-video and television systems; emergency lighting in the habitable area is provided by LED lights with built-in batteries. The paper proposes a developed compact electric power system for a habitable deep-water apparatus on modern domestic high-tech electrical equipment.

Keywords: deep-water apparatus, switched reluctance drive, batteries, propulsion, LED.

For citation:
Romanovsky, Viktor V., Boris V. Nikiforov, and Arsenii M. Makarov. "Selection and justification of the design electric power systems of deep water underwater apparatus." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 10.6 (2018): 1277–1287. DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-6-1277-1287.

УДК 621:313:3

ВЫБОР И ОБОСНОВАНИЕ КОНСТРУКЦИИ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМ ГЛУБОКОВОДНОГО ПОДВОДНОГО АППАРАТА

В. В. Романовский, Б. В. Никифоров, А. М. Макаров

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

В статье рассмотрен глубоководный аппарат, рассчитанный на глубину погружения от 2000 до 6000 м, его проектные характеристики и компоновка основных узлов. Аппарат имеет обводы корпуса, близкие к телу вращения с горизонтальной осью. Упрощение систем и снижение их стоимости позволяет максимально широко внедрять электроприводы, а систему гидравлики минимизировать. Рассматривается электроэнергетическая система постоянного тока, обеспечивающая электроэнергией всех потребителей аппарата. В качестве источника питания выбран вариант литий-ионных аккумуляторных батарей, находящихся в данный момент на ранней стадии развития, но обладающих высоким потенциалом для совершенствования. Двигательно-движительный комплекс состоит из вентильных индукторных двигателей, а резервный вариант — из электродвигателей с постоянными магнитами на роторе. Для первых описаны основные способы управления движением аппарата: изменение частоты вращения маршевых электродвигателей, включая их работу «вразнобой», а также использование рулей или поворотных профилированных решеток, установленных в струе каждого из маршевых электродвигателей. Отмечается, что в качестве источников света предпочтительными и перспективными являются светильники наружного и внутреннего освещения со встроенными светодиодами, показаны их

преимущества по сравнению со светильниками с традиционными лампами. Рассмотрены основные характеристики системы наружного освещения, фотовидеосъемки и системы телевидения; аварийное освещение в обитаемой сфере обеспечивается светодиодными светильниками со встроенными аккумуляторами. В статье предложена разработанная компактная электроэнергетическая система для обитаемого глубоководного аппарата на современном отечественном наукоемком электрооборудовании.

Ключевые слова: глубоководный аппарат, вентильно-индукторный двигатель, аккумуляторные батареи, движитель, светодиод.

Для цитирования:
Романовский В. В. Выбор и обоснование конструкции электроэнергетических систем глубоководного подводного аппарата / В. В. Романовский, Б. В. Никифоров, А. М. Макаров // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2018. — Т. 10. — № 6. — С. 1277–1287. DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-6-1277-1287.

Введение (Introduction)

Большая часть глубоководных аппаратов рассчитана на глубину погружения в 2000–3000 м, на глубину до 6000 м — значительно меньшая их часть. На максимальную океанскую глубину в 11 км изготовлены лишь два батискафа: Trieste (до модернизации) и Archimede. Это связано с реальными потребностями в изучении и освоении океана — более 95 % площади океанского дна находится на глубине до 6000 м. В 1990 гг. наблюдался непрерывный рост функциональности необитаемых систем, а также расширение их номенклатуры [1]–[3]. Минимизация размеров, веса и энергопотребления средств наблюдения, навигации и другого оборудования позволили создавать более компактные и многофункциональные аппараты. Наиболее освоенной зоной Мирового океана является шельфовая зона с глубинами 400–700 м, на которых ведутся различные работы коммерческого характера, в первую очередь, направленные на обеспечение добычи нефти и газа.

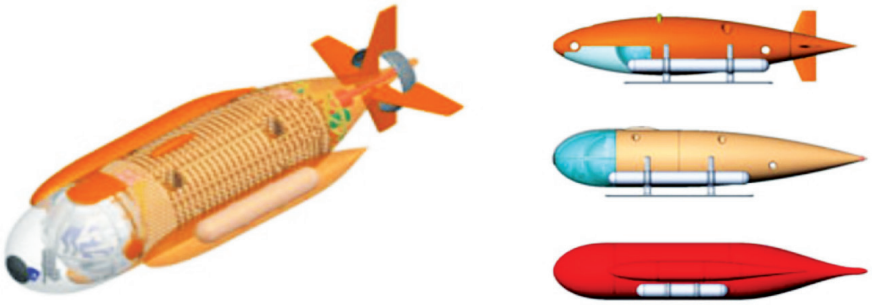


Рис. 1. Аппарат DeepSearch

«Ниша» по строительству обитаемых исследовательских аппаратов, рассчитанных на предельные глубины океана, на сегодняшний день остается свободной. Исключением является компания *Deep Ocean Exploration and Research*, ведущая проектные работы по созданию обитаемого подводного аппарата DeepSearch (рис. 1) с глубиной погружения в 11000 м. В связи с этим была поставлена задача разработать проектные характеристики, электроэнергетическую систему и движительный комплекс глубоководного обитаемого подводного аппарата, способного выполнять исследования на глубине до 6000 м в течение продолжительного периода времени и отвечающего основным международным требованиям безопасности.

Методы и материалы (Methods and materials)

Проектные характеристики глубоководного аппарата. Опыт эксплуатации обитаемых аппаратов показывает, что наилучшие условия работы операторов соблюдаются при размещении обитаемой сферы, манипуляторов, средств освещения обстановки и других рабочих средств в носовой части аппарата [4]–[6]. В связи с этим архитектурный облик аппарата с предлагаемой электроэнергетической системой (ЭЭС) в целом должен соответствовать хорошо зарекомендовавшему

себя аппарату «Мир» (1980 г.) — рис. 2.. В связи с сохраняющимся устойчивым спросом Китая, Индии и Вьетнама на обитаемые аппараты с глубиной погружения до 6000 м в данной работе оборудование ЭЭС предлагается именно для этой глубины.



Рис. 2. Аппараты «Мир»

Аппарат должен иметь обводы, близкие к телу вращения с горизонтальной осью. Цилиндрическая вставка должна составлять свыше половины длины аппарата. Прочные объемы должны быть выполнены из титанового сплава категории прочности 1100 МПа [7]–[9]. Внутренний диаметр обитаемой сферы равен 2000 мм, что позволит создать относительно комфортные условия для размещения и работы в нем трех человек, а также для размещения необходимой аппаратуры и систем. В сферу с иллюминаторами из кварцевого стекла доступ обеспечивается через люк. Внутренний диаметр прочной сферы для аккумуляторной батареи (АБ) составит 1000 мм. Установка «сухой» батареи вместо маслозаполненной позволит снизить затраты на разработку батареи, а также упростить ее обслуживание и замену.

В целях упрощения систем и снижения их стоимости максимально широко внедряются электроприводы (наметившаяся тенденция строительства полностью электрических судов при этом не должна стать исключением), система гидравлики минимизирована. Полное исключение гидравлики является желательным [10], но это возможно лишь после решения сложной и дорогостоящей задачи создания электроприводов манипуляторного устройства.

Маневрирование в горизонтальной плоскости осуществляется при помощи двух неповоротных маршевых электродвигателей (ЭД), вертикальное перемещение достигается работой двух вертикальных ЭД. Применение неповоротных двигателей способствует снижению стоимости двигательно-движительного комплекса в основном за счет минимизации требований к системе гидравлики, а также повышает надежность его функционирования [11]. Маневрирование аппаратом и всеми бортовыми системами производится посредством единой автоматизированной системы управления (СУ).

Сеть распределения электроэнергии. Предлагаемая ЭЭС постоянного тока (рис. 3) обеспечивает электроэнергией потребителей аппарата во всех режимах эксплуатации, в том числе в аварийном.

ЭЭС управляется интегрированной СУ техническими средствами аппарата. Электропитание двигательно-движительного комплекса, вспомогательных механизмов и устройств обеспечивается от основной АБ напряжением 175–320 В. Радиоэлектронная аппаратура, приборы [12]–[13] различных систем и системы жизнеобеспечения подключаются к вспомогательной и аварийной АБ напряжением 24–33 В.

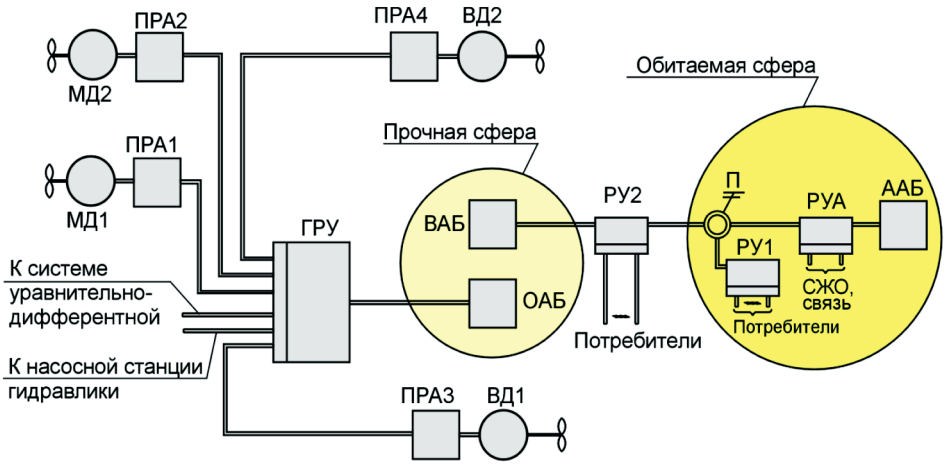


Рис. 3. Схема электроэнергетической системы:
ОАБ — основная АБ, 175-320В; *ААБ* — аварийная АБ, 24-33В; ВАБ — вспомогательная АБ, 24-33В; *МД*1, *МД*2 — маршевые электродвигатели; *ВД*1, *ВД*2 — вертикальные двигатели; *ГРУ* — главное распределительное устройство; *РУ*1, *РУ*2 — распределительные устройства; *РУА* — распределительное устройство аварийное; *ПРА*1-4 — пускозащитная и регулирующая аппаратура; *СЖО* — система жизнеобеспечения; *П* — переключатель

Аккумуляторные батареи (основная, вспомогательная и аварийная) комплектуются литий-ионными аккумуляторами (рис. 4), которые превосходят аккумуляторы других электрохимических систем по удельным энергетическим характеристикам, ресурсу, сроку службы и характеризуются минимальным обслуживанием, отсутствием газовыделений [14], низким саморазрядом, высокой надежностью и безопасностью, подтвержденными совершенной системой контроля и диагностики. Следует отметить, что аккумуляторы на основе литиевых систем сейчас находятся на ранней стадии развития и обладают высоким потенциалом для совершенствования.

По имеющимся данным, в настоящее время в мире нет эксплуатирующихся литий-ионных АБ (ЛИАБ) в маслозаполненном исполнении с компенсацией [15] внешнего давления на глубину более 6000 м. Разработка такой батареи возможна, однако потребуются значительные затраты времени (около двух лет) и средств для решения ряда проблем, связанных с заданной глубиной погружения, в том числе с проведением испытаний на полное давление и ресурсных испытаний. Поэтому предлагается вариант размещения батарей в прочной сфере как связанный с наименьшими затратами средств, времени и минимальным техническим риском.

Основная и вспомогательная АБ размещаются в прочной сфере диаметром 1000 мм. По оценкам, энергия основной и вспомогательной батарей составит 85 кВт·ч, в том числе 70 кВт·ч основной батареи и 15 кВт·ч вспомогательной. Общая масса батарей составит около 750 кг.

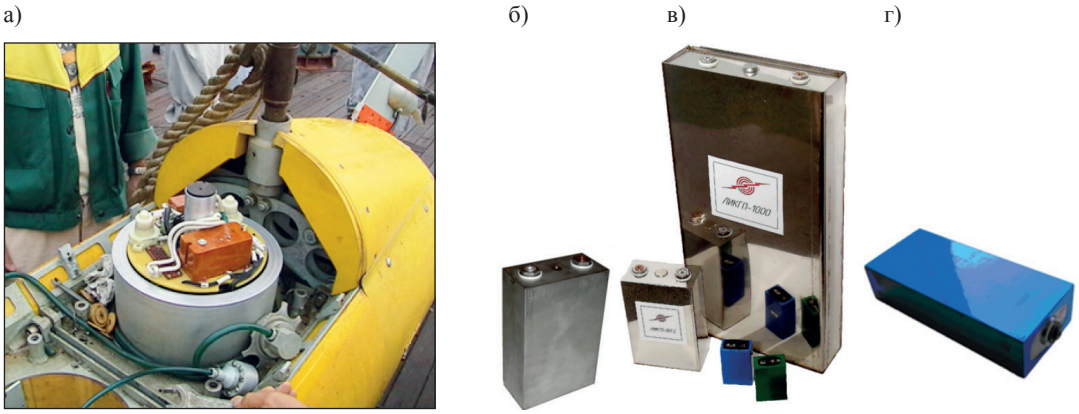


Рис. 4. Отечественные литий-ионные аккумуляторы емкостью:
а — 150 А·ч; *б* — 225 А·ч; *в* — 1000 А·ч; *г* — ЛИАБ на отечественном подводном аппарате

Аварийная батарея размещается в обитаемой сфере, ее энергия составляет 1,5 кВт·ч, напряжение — в пределах 24–33 В. Электроснабжение потребителей аппарата осуществляется через распределительные устройства, расположенные как внутри, так и снаружи обитаемой сферы аппарата. Внутри обитаемой сферы аппарата находятся РУ1 и РУА [16]–[17]. От РУ1 запитываются основные потребители сети постоянного тока 24–33 В. От РУА получают электропитание система жизнеобеспечения и аварийная связь. Вне прочного корпуса аппарата расположены РУ2 и ГРУ. От РУ2 электропитание 24–33 В получают серводвигатели, электроприводы и другие забортные потребители. От ГРУ снабжаются электропитанием постоянного тока 175–320 В маршевые ЭД, подруливающие устройства, ЭД насосной станции гидравлики и ЭД насоса уравнительно-дифференционной системы.

На аппарате предлагаются к установке вентильно-индукторные двигатели (ВИД) открытого исполнения, при котором внутренние полости охлаждаются забортной водой [18]. Выбор ВИД обусловлен высокими энергетическими характеристиками, исключительной надежностью и возможностью работы в тяжелых условиях. В качестве запасного может рассматриваться вариант ЭД с постоянными магнитами на роторе. Управление электроприводами дистанционное, от встроенных элементов блоков управления в СУ. Исполнение пускозащитной и регулирующей аппаратуры маслозаполненное, что требует испытаний для подтверждения нормального функционирования электрорадиоизделий, погруженных в масло под давлением.

На сегодняшний день кабелей, пригодных для работы при гидростатическом давлении 110 МПа, не выпускается российской промышленностью [19]. Для зарубежных глубоководных аппаратов кабели изготавливались под заказ на зарубежных предприятиях. Использование данной электроэнергетической системы увеличит время работы глубоководного аппарата при возникновении нештатной ситуации: например, при выходе из строя вспомогательной АБ ввиду наличия резервной. Применение литий-ионных АБ позволяет выдавать более высокое напряжения (по сравнению с аккумуляторами типов NiCd и NiMH), не имеет «эффекта памяти» — возможности регулярной небольшой подзарядки, а также относительно небольшой вес по сравнению с другими типами АБ.

Двигательно-движительный комплекс. Предусматриваются два маршевых ЭД мощностью по 5 кВт с винтами в насадках. Диаметр винтов около 400 мм, частота вращения регулируется 40–400 об/мин с возможностью реверса. ВИД (рис. 5) изготавливаются серийно, с частотой вращения 3000 об/мин, поэтому для открытого исполнения потребуется конструктивная переработка самого двигателя.

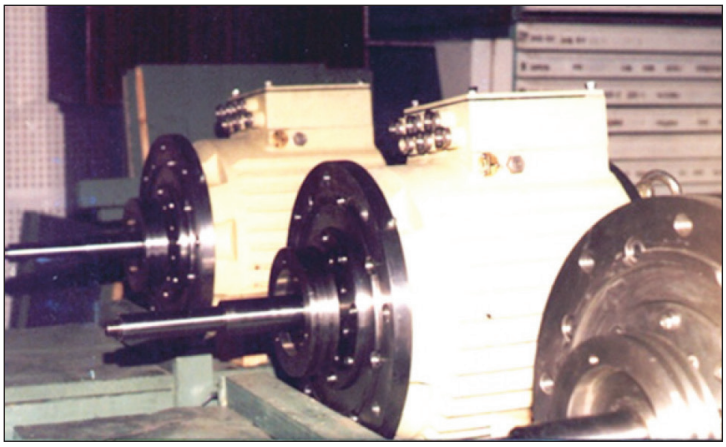


Рис. 5. ВИД мощностью 5,5 кВт

Предусмотрены два вертикальных ЭД мощностью по 3 кВт с винтами в водоводах. Диаметр винтов составляет порядка 300 мм, частота вращения варьируется 40–400 об/мин с возможностью реверсирования [20]–[21]. ВИД (рис. 6) поставляется серийно, но потребуется его конструктивная доработка.

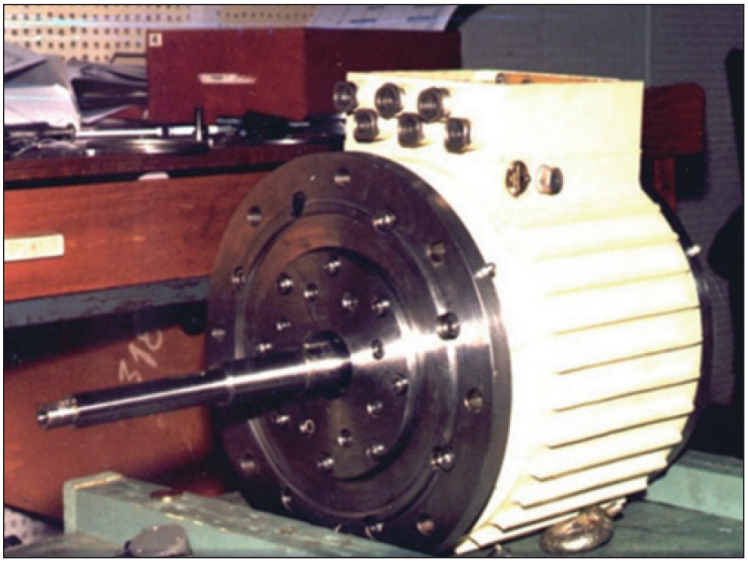


Рис. 6. ВИД мощностью 3 кВт

Комплекс обеспечит достижение аппаратом горизонтальной скорости около 3,5 уз и вертикальной скорости около 0,6 уз [22]–[26].

Основные способы управления движением аппарата:

– изменение частоты вращения маршевых ЭД, включая их работу «вразнобой»;

– использование рулей или поворотных профилированных решеток, установленных в струе каждого из маршевых ЭД. Привод руля или решетки электрический.

Использование ВИД в качестве гребных обуславливает его высокую надежность и живучесть — одно из основных практических преимуществ ВИД по сравнению с традиционными типами электрических машин. В случае использования гребных АД при замыкании фазных обмоток или при межвитковом замыкании фазной обмотки АД выйдет из строя, в то время как отказ одной или даже нескольких фаз гребного ВИД не нарушает его работу, так как при наличии некоторого резерва по току и напряжению фаз снижение выходной мощности частично или полностью компенсируется увеличением нагрузки фаз, оставшихся в работе.

Система освещения. В качестве источников света предпочтительны и перспективны светильники наружного и внутреннего освещения со встроенными светодиодами (СД) или светодиодными матрицами (СД-светильники).

Основные преимущества СД-светильников по сравнению со светильниками с традиционными лампами [27]–[29]:

– малая потребляемая мощность;

– длительный срок службы светодиодов (более 50 000 ч);

– высокая устойчивость к механическим воздействиям;

– способность функционирования в широком диапазоне окружающих температур;

– отсутствие экологически вредных компонентов.

Для наружного освещения дополнительными преимуществами СД светильников являются [30]:

– большая заметность свечения в водной среде квазимонохроматического спектра излучения для длин волн от 520 до 610 нм (центральная часть видимого диапазона длин волн, зона максимальной чувствительности человеческого глаза);

– незначительное рассеяние света и ореольное подсвечивание воды в зоне действия светильника при наличии взвесей и биопланктона, что увеличивает четкость [31]–[32] и контрастность картины при работе подводной телеаппаратуры при цветовой температуре белого свечения 5500 К.

Для визуального наблюдения, фотовидеосъемки и системы телевидения требуется установка глубоководных СД светильников в количестве пяти штук, рассчитанных на глубину погружения до 11 000 м [33]. В настоящее время освоено производство глубоководных светильников (рис. 7).



Рис. 7. Глубоководный светодиодный светильник

Основные характеристики системы наружного освещения:
– количество светильников — 5 шт.;
– световой поток одного светильника — 5 000 лм;
– мощность одного светильника — 150 Вт;
– напряжение электропитания — 20–36 В;
– дальность исследования объектов — 10 м.

Для освещения внутренних помещений предусматриваются светильники с питанием также от сети 24–33 В.

Светодиодная лента для освещения обитаемой сферы имеет минимальные массу и габариты. Контроллер управления яркостью обеспечивает плавную регулировку освещенности в обитаемом корпусе. Общий уровень освещенности создается светодиодной лентой, подсветкой приборных панелей и местной подсветкой рабочих мест операторов.

Характеристики системы внутреннего освещения:
– количество — две световых ленты;
– световой поток — 400 лм на 1 м ленты;
– мощность — 7,2 Вт на 1 м ленты.

Аварийное освещение в обитаемой сфере обеспечивается светодиодными светильниками со встроенными аккумуляторами, которые в нормальном режиме не работают, а включаются в работу автоматически от собственного аккумулятора при пропадании электропитания. Кроме того, предусматривается переносное освещение светодиодными светильниками налобного или ручного исполнения, получающими электропитание от автономных аккумуляторов. Использование светодиодных светильников и ламп позволит существенно снизить энергопотребление по сравнению с использованием других источников света и уменьшить расход светодиодных ламп из-за их устойчивости к механическим повреждениям.

Выводы (Conclusion)

В работе рассмотрены проектные характеристики глубоководного обитаемого подводного аппарата, способного работать на глубинах до 6000 м продолжительное время, а также предложена разработанная компактная электроэнергетическая система на современном отечественном наукоемком электрооборудовании, которое при необходимости легко дорабатывается (перерабатывается) под конкретные требования, предъявляемые к аппарату.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Дмитриев А. Н.* Проектирование подводных аппаратов / А. Н. Дмитриев. — Л.: Судостроение, 1978. — 235 с.

2. *Никифоров Б. В.* Аккумуляторные батареи подводных аппаратов / Б. В. Никифоров, А. И. Русин. — Новочеркасск: Колорит, 2011. — 162 с.

3. *Никифоров Б. В.* Корабельный электропривод / Б. В. Никифоров. — Новочеркасск: Лик, 2014. — 270 с.

4. *Дядик А. Н.* Корабельные энергетические системы / А. Н. Дядик, Б. В. Никифоров. — Новочеркасск: Колорит, 2012. — 680 с.

5. *Дарьенков А. Б.* Гребные электрические установки / А. Б. Дарьенков [и др.]. — Н. Новгород: Изд-во НГТУ им. Р. Е. Алексеева, 2014. — 219 с.

6. *Высоцкий В. Е.* Электромеханические процессы в вентильном двигателе с постоянными магнитами / В. Е. Высоцкий, А. П. Синицын, С. А. Тарашев // Вестник Самарского государственного технического университета. Серия: Технические науки. — 2010. — № 2 (27). — С. 139–144.

7. *Птах Г. К.* Вентильно-индукторный реактивный электропривод средней и большой мощности: зарубежный и отечественный опыт / Г. К. Птах // Электротехника: сетевой электронный научный журнал. — 2015. — Т. 2. — № 3. — С. 23–33.

8. *Лагода Ф. И.* Вентильные двигатели / Ф. И. Лагода // Актуальные вопросы энергетики: материалы Всероссийской науч. конф. студентов, магистрантов, аспирантов. — Омск: Омский государственный технический университет, 2016. — С. 76–80.

9. *Быков А. С.* Гребные электрические установки атомных ледоколов / А. С. Быков, В. А. Малышев, В. В. Романовский. — СПб.: Элмор, 2004. — 320 с.

10. *Никифоров Б. В.* Перспективы применения вентильных индукторных приводов в составе СЭД ДЭПЛ / Б. В. Никифоров, А. А. Цветков // Интеллектуальные электромеханические системы и комплексы специального назначения. — 2013. — №3. — С. 11–16.

11. *Emadi A.* Energy-Efficient Electric Motors / A. Emadi. — New York: Marcel Dekker, Inc., 2004. — 406 p.

12. *Дядик А. Н.* Корабельные энергетические системы / А. Н. Дядик, Б. В. Никифоров. — Новочеркасск: Колорит, 2012. — 680 с.

13. А. с. 332499. Асинхронный генератор в ЭЭС / Б. В. Никифоров, В. Н. Давыдов; опубл. 08.01.91.

14. *Кузнецов В. И.* Бестрансформаторные единые электроэнергетические системы: дис. ... канд. техн. наук: 05.09.03 / В. И. Кузнецов. — СПб.: СПБГМТУ, 2015. — 159 с.

15. *Никифоров Б. В.* Вентильно-индукторные двигатели для тяговых электроприводов / Б. В. Никифоров, С. А. Пахомин, Г. К. Птах // Электричество. — 2007. — № 2. — С. 34–38.

16. *Никифоров Б. В.* Исследования вентильного индукторного двигателя в составе насосного агрегата / Б. В. Никифоров, А. А. Цветков // Электротехника. — 2007. — № 6. — С. 24а–33.

17. *Никифоров Б. В.* Развитие систем электропривода подводных лодок (в порядке обсуждения) / Б. В. Никифоров // Судостроение. — 1999. — № 5. — С. 23–25.

18. *Proverbs J.* Aspects of electro-magnetic aircraft launch and linear machine development / J. Proverbs, S. Colyer, T. Cox, J. F. Eastham // IEEE transaction on Magnetics. — 2010. — Vol. 46. — Is. 12. — Pp. 57–59.

19. *Petersen L. J.* Next-Generation Power and Energy: Maybe Not So Next Generation / L. J. Petersen, D. J. Hoffman, J. P. Borraccini, S. B. Swindler // Naval Engineers Journal. — 2010. — Vol. 122. — Is. 4. — Pp. 59–74. DOI: 10.1111/j.1559-3584.2010.00280.x.

20. *Ehrhart P.* The a11-electric ship: ready to take over? / P. Ehrhart // Naval Forces. — 2011. — Vol. XXXII. — Pp. 41–45.

21. *Cao X.* Advanced Control Method for a Single-Winding Bearingless Switched Reluctance Motor to Reduce Torque Ripple and Radial Displacement / X. Cao, J. X. Zhou, C. Y. Liu, Z. Q. Deng // IEEE Transactions on energy conversion. — 2017. — Vol. 32. — Is. 4. — Pp. 1533–1543. DOI: 10.1109/TEC.2017.2719160.

22. *Jamai H.* Optimal Switched Reluctance Motor Drive for Hydraulic Pump unit / H. Jamai, M. Kaneda, K. Ohyama, Y. Takeda, N. Matsai. — IEEE INTECH, 2000. — Pp. 98–101.

23. *Buckingham J.* Submarine Power and Propulsion - Application of Technology to Deliver Customer Benefit / J. Buckingham, C. Hodge, T. Hardy. — Bath, UK: BMT Defence Services Ltd., 2008. — 17 p.

24. *Зайцев А. А.* Транспорт на магнитном подвесе / А. А. Зайцев, Г. Н. Талашкин, Я. В. Соколова. — СПб.: Изд-во ПГУПС, 2010. — 60 с.

25. *Ding W.* Design Consideration and Evaluation of a 12/8 High-Torque Modular-Stator Hybrid Excitation Switched Reluctance Machine for EV Applications / W. Ding, S. Yang, Y. Hu, S. Li, T. Wang, Z. Yin // IEEE Transactions on industrial electronics. — 2017. — Vol. 64. — Is. 12. — Pp. 9221–9232. DOI: 10.1109/TIE.2017.2711574.

26. *Никифоров Б. В.* Корабельные системы электродвижения: дис. … д-ра техн. наук / Б. В. Никифоров. — СПб.: ЦКБ Морской техники «РУБИН», 2006. — 311 с.

27. *Григорьев А. В.* Единая электроэнергетическая установка гидрографического судна на базе системы электродвижения переменного тока / А. В. Григорьев, К. С. Ляпидов, Л. С. Макаров // Судостроение. — 2006. — № 4. — С. 33–34.

28. Пат. 2324272 Российская Федерация, МПК H 02 J 9/06. Интеллектуальный преобразователь напряжения постоянного тока для динамически изменяющейся нагрузки / В. Е. Апиков [и др.]; заяв. и патентообл. Центральное конструкторское бюро морской техники «РУБИН», ЗАО «ИРИС», ФГУП «Производственно-конструкторское предприятие «ИРИС»». — № 2006120505/09; заявл. 13.06.2006; опубл. 10.05.2008, Бюл. № 13.

29. *Ralev I.* Impact of Smooth Torque Control on the Efficiency of a High-Speed Automotive Switched Reluctance Drive / I. Ralev, F. Qi, B. Burkhart, A. Klein-Hessling, R. W. De Doncker // IEEE Transactions on industry applications. — 2017. — Vol. 53. — Is. 6. — Pp. 5509–5517. DOI: 10.1109/TIA.2017.2743680.

30. *Yin F.* Non-probabilistic reliability analysis and design optimization for valve-port plate pair of seawater hydraulic pump for underwater apparatus / F. Yin, S. Nie, H. Ji, Y. Huang // Ocean engineering. — 2018. — Vol. 163. — Pp. 337–347. DOI: 10.1016/j.oceaneng.2018.06.007.

31. *Никифоров Б. В.* Создание корабельных систем электродвижения с вентильно-индукторным электроприводом / Б. В. Никифоров, А. П. Темирёв, О. Е. Лозицкий // Известия высших учебных заведений. Электромеханика. — 2007. — № 4. — С. 62–66.

32. *Sakovich S. Y.* Position based motion control of the underwater vehicle on video data at the underwater pipeline inspection / S. Y. Sakovich, Y. L. Siek // Marine intellectual technologies. — 2018. — Vol. 1. — № 2. — Pp. 127–133.

33. *Goncharuk V. K.* Creation of glass-metal composite cylindrical shells for deep-sea submersibles pressure hulls / V. K. Goncharuk, S. V. Antonenko, A. A. Bocharova, A. A. Ratnikov // Marine intellectual technologies. — 2018. — № 3. — Pp. 76–83.

REFERENCES

1. Dmitriev, A. N. *Proektirovanie podvodnykh apparatov.* L.: Sudostroenie, 1978.

2. Nikiforov, B. V., and A. I. Rusin. *Akkumulyatornye batarei podvodnykh apparatov.* Novocherkassk: Izd. «Kolorit», 2011.

3. Nikiforov, B. V. *Korabel'nyi elektroprivod*. Novocherkassk: Lik, 2014.

4. Dyadik, A. N., and B. V. Nikiforov. *Korabel'nye energeticheskie sistemy.* Novocherkassk: Izd. «Kolorit», 2012.

5. Dar'enkov, A. B., G. M. Miryasov, V. G. Titov, M. N. Okhotnikov, and D. V. Umyarov. *Grebnye elektricheskie ustanovki*. Nizhnii Novgorod: Nizhegorodskii gosudarstvennyi tekhnicheskii universitet im. R.E. Alekseeva, 2014.

6. Vysotsky, V. E., A. P. Sinicin, and S. A. Tarashev. "Electromechanical processes in ventil engine with constant magnets." *Vestnik Samarskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya: Tekhnicheskie nauki* 2(27) (2010): 139–144.

7. Ptakh, G. K. "Switched Reluctance Drive Medium and High Power: Foreign and Domestic Experience." *Russian Internet Journal of Electrical Engineering* 2.3 (2015): 23–33.

8. Lagoda, F. I. "Ventil'nye dvigateli." *Aktual'nye voprosy energetiki: Materialy Vserossiiskoi nauchnoi konferentsii studentov, magistrantov, aspirantov*. Omsk: Omskii gosudarstvennyi tekhnicheskii universitet, 2016. 76–80.

9. Bykov, A. C., V. A. Malyshev, and V. V. Romanovskii. *Grebnye elektricheskie ustanovki atomnykh ledokolov*. SPb.: Elmor, 2004.

10. Nikiforov, B.V., and A.A. Tsvetkov. "Perspektivy primeneniya ventil'nykh induktornykh privodov v sostave SED DEPL." *Intellektual'nye elektromekhanicheskie sistemy i kompleksy spetsial'nogo naznacheniya*. Novocherkassk: Izd. Lik, YuRGTU. 11–16.

11. Emadi, A. *Energy-Efficient Electric Motors*. New York: Marcel Dekker, Inc., 2004.

12. Dyadik, A. N., and B. V. Nikiforov. *Korabel'nye energeticheskie sistemy.* Novocherkassk: Izd. «Kolorit», 2012.

13. Nikiforov, B. V., and V. N. Davydov. № 332499. Asinkhronnyi generator v EES. USSR, assignee. Publ. 8 Jan. 1991.

14. Kuznetsov, V. I. Bestransformatornye edinye elektroenergeticheskie sistemy. PhD diss. SPb.: SPBGMTU, 2015.

15. Nikiforov, B. V., S. A. Pakhomin, and G. K. Ptakh. "Switched Reluctance Motors for Traction Electric Drives." *Electrical Technology Russia* 2 (2007): 34–38.

16. Nikiforov, B. V., and A. A. Tsvetkov. "Studies of an AC converter-fed motor incorporated in a pump unit." *Russian Electrical Engineering* 78.6 (2007): 298–305. DOI: 10.3103/S1068371207060065.

17. Nikiforov, B. V. "Evolution of electric propulsion systems for submarines." *Sudostroenie* 5 (1999): 23–25.

18. Proverbs, J., S. Colyer, T. Cox, and J. F. Eastham. "Aspects of electro-magnetic aircraft launch and linear machine development." *IEEE transaction on Magnetics* 46.12 (2010): 57–59.

19. Petersen, Lynn J., D. J. Hoffman, J. P. Borraccini, and S. B. Swindler. "Next-Generation Power and Energy: Maybe Not So Next Generation." *Naval Engineers Journal* 122.4 (2010): 59–74. DOI: 10.1111/j.1559-3584.2010.00280.x.

20. Ehrhart, P. "The a11-electric ship: ready to take over?." *Naval Forces* XXXII (2011): 41–45.

21. Cao, X., J. X. Zhou, C.Y. Liu, and Z.Q. Deng. "Advanced Control Method for a Single-Winding Bearingless Switched Reluctance Motor to Reduce Torque Ripple and Radial Displacement." *IEEE Transactions on energy conversion* 32.4 (2017): 1533–1543. DOI: 10.1109/TEC.2017.2719160.

22. Jamai, H., M. Kaneda, K. Ohyama, Y. Takeda, and N. Matsai. "Optimal Switched Reluctance Motor Drive for Hydraulic Pump unit." IEEE, 2000. 98–101.

23. Buckingham, J., C. Hodge, and T. Hardy. *Submarine Power and Propulsion - Application of Technology to Deliver Customer Benefit*. Bath, UK: BMT Defence Services Ltd., 2008.

24. Zaitsev, A. A., G. N. Talashkin, and Ya.V. Sokolova. *Transport na magnitnom podvese*. SPb.: PGUPS, 2010.

25. Ding, W., S. Yang, Y. Hu, S. Li, T. Wang, and Z. Yin. "Design Consideration and Evaluation of a 12/8 High-Torque Modular-Stator Hybrid Excitation Switched Reluctance Machine for EV Applications." *IEEE Transactions on industrial electronics* 64.12 (2017): 9221–9232. DOI: 10.1109/TIE.2017.2711574.

26. Nikiforov, B.V. Korabel'nye sistemy elektrodvizheniya. Dr. diss. SPb.: 2006.

27. Grygoriev, A. V., K. S. Lyapidov, and L. S. Makarov. "Unified hydrographic ship's electric power plant based on the alternating current motion system." *Sudostroenie* 4 (2006): 33–34.

28. Apikov, V. E., K. S. Lyapidov, O. E. Lozitskii, and B. V. Nikiforov. RU 2 324 272 C2, IPC H 02 J 9/06. Intellektual'nyi preobrazovatel' napryazheniya postoyannogo toka dlya dinamicheski izmenyayushcheisya nagruzki. Russian Federation, assignee. Publ. 10 May 2008.

29. Ralev, I., F. Qi, B. Burkhart, A. Klein-Hessling, and R. W. De Doncker. "Impact of Smooth Torque Control on the Efficiency of a High-Speed Automotive Switched Reluctance Drive." *IEEE Transactions on industry applications* 53.6 (2017): 5509–5517. DOI: 10.1109/TIA.2017.2743680.

30. Yin, Fanglong, Songlin Nie, Hui Ji, and Yeqin Huang. "Non-probabilistic reliability analysis and design optimization for valve-port plate pair of seawater hydraulic pump for underwater apparatus." *Ocean Engineering* 163 (2018): 337–347. DOI: 10.1016/j.oceaneng.2018.06.007.

31. Nikiforov, B. V., A. P. Temirev, and O. E. Lozitskii. "Sozdanie korabel'nykh sistem elektrodvizheniya s ventil'no-induktornym elektroprivodom." *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Elektromekhanika* 4 (2007): 62–66.

32. Sakovich, Sergey Yu, and Yuriy L. Siek. "Position based motion control of the underwater vehicle on video data at the underwater pipeline inspection." *Marine intellectual technologies* 1.2 (2018): 127–133.

33. Goncharuk, V. K., S. V. Antonenko, A. A. Bocharova, and A. A. Ratnikov. "Creation of glass-metal composite cylindrical shells for deep-sea submersibles pressure hulls." *Marine intellectual technologies* 3 (2018): 76–83.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

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

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Romanovsky, Viktor 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: *kaf_edas@gumrf.ru*

Никифоров Борис Владимирович — доктор технических наук, профессор
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова»
198035, Российская Федерация, Санкт-Петербург, ул. Двинская, 5/7
e-mail: *boris.nic-b@yandex.ru*, *kaf_edas@gumrf.ru*
Макаров Арсений Михайлович — аспирант
Научный руководитель:
Романовский Виктор Викторович
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова»
198035, Российская Федерация, Санкт-Петербург, ул. Двинская, 5/7
e-mail: *makar_tnt@mail.ru*, *kaf_edas@gumrf.ru*

Nikiforov, Boris 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: *boris.nic-b@yandex.ru*, *kaf_edas@gumrf.ru*
Makarov, Arsenii M. — Postgraduate
Supervisor:
Romanovsky, Viktor V.
Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping
5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg, 198035, Russian Federation
e-mail: *makar_tnt@mail.ru*, *kaf_edas@gumrf.ru*

Статья поступила в редакцию 7 декабря 2018 г.
Received: December 7, 2018.

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

ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И АВТОМАТИЗАЦИЯ НА ТРАНСПОРТЕ

DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-6-1288-1298

THE STRUCTURAL-FUNCTIONAL MODEL OF A TRAINEE IN THE SYSTEM OF TRAINING SIMULATOR FOR NAVIGATION

A. P. Nyrkov[1], S. A. Alekseev[2], R. E. Stahno[2]

[1] — Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping, St. Petersburg, Russian Federation
[2] — St. Petersburg University of the Ministry of Internal Affairs of Russia, St. Petersburg, Russian Federation

The article deals with the construction of the model of the cognitive activity of the learner as a subject who carries out purposeful and conscious activity in the self-development of skills in professional activities and personal characteristics realized in the course of simulator training in navigation. Four successively mastered levels are defined for both students based on the depth of the orienting basis of actions, as well as the completeness of the presentation of the situation and the purpose of the activity, as well as the way to solve professional problems. A private model of the trainee in the system of simulator training, acting within the didactic subsystem of the organizational management of the simulator training system exposed to two types of control actions, has been built up: on the part of the head of training and self-management. On this basis, a model of cognitive activity of the trainee was constructed, which served as the basis for constructing the structural-functional model of the trainee, exercising simulator training. This model includes a description of the totality of skills and skills developed during the training, as well as a set of personal characteristics that complement skills. Based on the norms of pedagogy, four levels of assimilation of activity in navigation for students are established: operational, functional, constructive and creative. A set of indicators that characterizes the achieved level of mastering by the trainees is defined: the breadth of experience, the quality of assimilation of activity, the strength of assimilation. A list of personal characteristics has been developed, which must be developed by the learner during the training. The model of the trainee is supplemented with a description of independent efforts to create professional skills and develop personal characteristics. It is concluded that the activities of a navigational specialist are characterized by goals, situations, ways of implementation and conditions.

Keywords: training, professional problem, personality characteristic, self-development, model of the learner, operator, specialist, navigation.

For citation:
Nyrkov, Anatoliy P., Sergey A. Alekseev, and Roman E. Stahno. "The structural-functional model of a trainee in the system of training simulator for navigation." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 10.6 (2018): 1288–1298. DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-6-1288-1298.

УДК 681.5.017

СТРУКТУРНО-ФУНКЦИОНАЛЬНАЯ МОДЕЛЬ ОБУЧАЮЩЕГОСЯ В СИСТЕМЕ ТРЕНАЖЕРНОЙ ПОДГОТОВКИ ПО СУДОВОЖДЕНИЮ

А. П. Ныркov[1], С. А. Алексеев[2], Р. Е. Стахно[2]

[1] — ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова», Санкт-Петербург, Российская Федерация
[2] — Санкт-Петербургский университет МВД России, Санкт-Петербург, Российская Федерация

В статье рассмотрены вопросы построения модели познавательной деятельности обучающегося как субъекта, осуществляющего целенаправленную и сознательную деятельность по саморазвитию

умений и навыков в профессиональной деятельности и личностных характеристик, реализуемых в ходе тренажерной подготовки по судовождению. Определены четыре последовательно осваиваемых обучающимся уровня как по признакам глубины ориентировочной основы действий, так и полноты представления ситуации и цели деятельности, а также способа решения профессиональных задач. Построена частная модель обучающегося в системе тренажерной подготовки, действующего в рамках дидактической подсистемы организационного управления системы тренажерной подготовки, подверженного двум видам управляющих воздействий: со стороны руководителя тренажерной подготовки и с помощью самоуправления. На этой основе предложена модель познавательной деятельности обучающегося, которая послужила базой построения структурно-функциональной модели обучающегося, осуществляющего тренажерную подготовку. Эта модель включает описание совокупности умений и навыков, вырабатываемых в ходе тренажерной подготовки, а также совокупности личностных характеристик, дополняющих умения и навыки. Установлены четыре уровня усвоения деятельности по судовождению обучающимся: операционный, функциональный, конструктивный и творческий. Определен состав показателей, характеризующий достигнутый уровень усвоения обучающимся: качество усвоения информации и прочность ее усвоения. Разработан перечень личностных характеристик, которые должны быть выработаны обучающимся в ходе тренажерной подготовки. Модель обучающегося дополнена описанием его самостоятельных усилий по формированию профессиональных умений и навыков и выработке личностных характеристик. Сделаны выводы о том, что деятельность специалиста по судовождению характеризуется целями, ситуациями, способами выполнения и условиями.

Ключевые слова: тренажерная подготовка, профессиональная задача, личностная характеристика, саморазвитие, модель обучающегося, оператор, специалист, судовождение.

Для цитирования:

Нырков А. П. Структурно-функциональная модель обучающегося в системе тренажерной подготовки по судовождению / А. П. Нырков, С. А. Алексеев, Р. Е. Стахно // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2018. — Т. 10. — № 6. — С. 1288–1298. DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-6-1288-1298.

Введение (Introduction)

Использование тренажеров для подготовки и переподготовки специалистов в различных отраслях является одним из важнейших аспектов повышения качества образовательного процесса. Подготовка судоводителей, в частности, для оценки и контроля индикаторов процесса обучения «знать – уметь – владеть» предполагает наличие соответствующих моделей [1].

Необходимым условием моделирования процесса организационного управления (ОУ) тренажерной подготовкой (ТП) с позиций системного подхода является многовекторное изучение как обучаемого в качестве объекта воздействия со стороны руководителя ТП, так и субъекта обучения, самостоятельно управляющего собственной познавательной деятельностью по развитию профессиональных навыков и умений по судовождению. Следовательно, при построении модели ОУ ТП по судовождению определяется два управляющих воздействия: внешнее и внутреннее. Внешнее воздействие формируется в виде целенаправленной деятельности руководителя ТП, внутреннее исходит от обучаемого, управляющего собственным саморазвитием в системе ТП по судовождению (рис. 1).

Таким образом, существуют два вида управления (воздействие U_1 и U_2):

− управляющее действие руководителя ТП на обучающегося:

$$U_1 = \varphi_1(X_1, Y_1, Z_1, R); \quad (1)$$

− самоуправление обучающегося:

$$U_2 = \varphi_2(X_2, Y_2, Z_2, R). \quad (2)$$

Эффективность воздействий при ТП на обучающегося судовождению может быть определена по формуле

$$K_{эф} = \varphi_3(U_1, U_2). \quad (3)$$

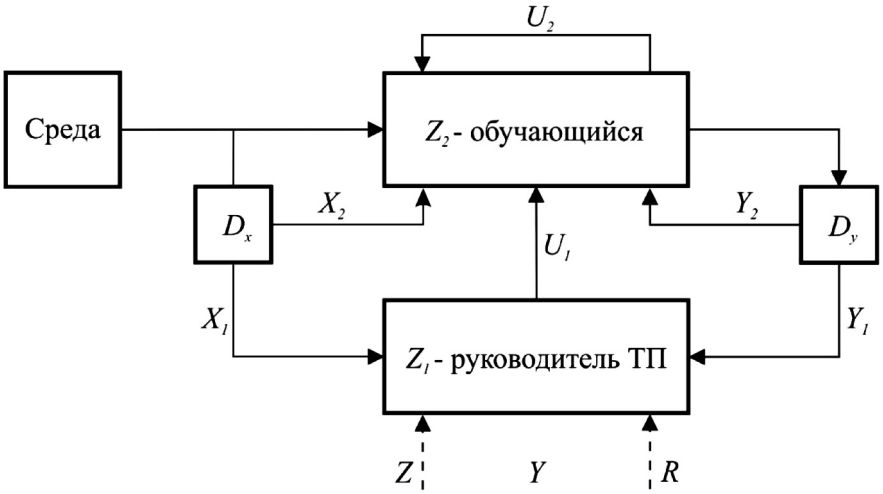


Рис. 1. Модель познавательной деятельности обучающегося, реализуемой в ходе тренажерной подготовки по судовождению:
D_y — датчик состояния обучающегося; D_x — датчик состояния среды;
Y_1 — информация о состоянии обучающегося, передаваемая руководителю ТП;
Y_2 — информация о состоянии обучающегося, используемая для самооценки;
X_1 — информация о состоянии среды, передаваемая руководителю ТП; X_2 — информация о состоянии среды, передаваемая обучающемуся; U_1 — управляющее воздействие руководителя ТП на обучающегося;
U_2 — управляющее самовоздействие обучающегося; Z — цели тренажерной подготовки;
Z_1 — цели руководителя ТП; Z_2 — цели обучающегося; R — ресурсозатраты на ТП

При построении модели обучающегося судовождению как объекта внешнего и внутреннего воздействия разрабатываются три составляющих компонента: во-первых, решаются задачи ОУ ТП по выработке у обучающегося требуемых умений и навыков по судовождению; во-вторых, разрабатывается управление эффективностью получения знаний по судовождению (уровень умений и навыков), которое определяется структурой и свойствами входящих в него действий; в-третьих, разрабатывается управление эффективностью формирования и развития заданных личностных характеристик обучающегося.

Методы и материалы (Methods and Materials)

С позиции решения задач ОУ ТП модель обучающегося должна включать описания профессиональных качеств, «встроенных» в деятельностную модель обучаемого, позволяющих эффективно отвечать установленным для будущего судоводителя требованиям-индикаторам: знать, уметь и владеть, а также личностных качеств, дополняющих профессиональные качества и позволяющих перейти к построению личностно-деятельностной модели, включающей в себя дополнительно саморазвитие.

Выделение и формализованное представление показателей позволяет оценить эффективность подготовки будущих специалистов по судовождению в следующих направлениях [2]:

− эффективность усвоения обучающимися программы ТП по циклам дисциплин учебного плана, определяемых государственным образовательным стандартом высшего образования;

− уровень подготовленности выпускников к выполнению задач профессиональной деятельности;

− степень сформированности личностных характеристик, определяемых требованиями к будущему специалисту по судовождению.

Следовательно, результаты реализации мероприятий ТП могут быть записаны применительно к модели обучающегося в виде вектора:

$$\vec{R}^{\text{ТП}} = \left[\vec{R}_{\text{у}}^{\text{ТП}}, \vec{R}_{\text{н}}^{\text{ТП}}, \vec{R}_{\text{ЛХ}}^{\text{ТП}} \right], \quad (4)$$

где $\vec{R}_{\text{у}}^{\text{ТП}}$— показатель уровня умений профессиональной деятельности;

$\vec{R}_{\text{н}}^{\text{ТП}}$ — показатель уровня навыков профессиональной деятельности;

$\vec{R}_{\text{ЛХ}}^{\text{ТП}}$ — показатель степени развития личностных характеристик.

Количественная мера результатов ТП может быть выражена через показатель эффективности вида

$$K = \left[K_{m,\,n}^{Y}, K_{m,\,n}^{\text{н}}, K_{m,\,n}^{\text{ЛХ}} \right], \tag{5}$$

где $K_{m,\,n}^{i} = \left[k_{m,\,n}^{i} \right]$ — матрица показателей m-го аспекта n-го результата ТП;

$K_{m,\,n}$ — показатель проявления m-го аспекта n-го результата ТП.

При определении меры сформированности умений и навыков у обучающегося в ходе ТП по судовождению вводится *критерий мастерства*, который и служит показателем эффективности ТП. Успешность деятельности будущего судоводителя, в существенной степени, зависит от того, насколько хорошо он усвоил в процессе тренажерной подготовки материал образовательной программы. Эффективная подготовка обучаемого управлению сложными техническими и технологическими системами в процессе судовождения включает порядок действий и принятия решений по управлению судном в сложных ситуациях под воздействием большого количества факторов. Следовательно, деятельность D по управлению любым образцом техники в общем случае определяется последовательностью элементов:

$$D = \langle G,\ S,\ R,\ \Omega \rangle, \tag{6}$$

где $G = \{g_i\}$ — множество целей деятельности;

$S = \{s_j\}$ — множество ситуаций, возникающих при реализации деятельности;

$R = \{r_k\}$ — множество способов выполнения действий (алгоритмов);

$\Omega = \{\omega_l\}$ — множество условий деятельности.

Структуру деятельности специалиста по судовождению принято делить на четыре последовательно осваиваемых обучающимся уровня: операционный, функциональный, конструкторский и творческий (табл. 1).

Таблица 1

Уровни усвоения деятельности обучающегося в ходе тренажерной подготовки

Наименование уровня	Шифр	Формальная характеристика
Операционный	α_1	Заданы цель g_j и множества S, R, Ω. Обучающийся должен в соответствии с g_j выбрать соответствующие элементы: g_j, S_k, ω_l
Функциональный	α_2	Заданы цель g_j и соответствующие цели элементов множеств S и Ω. Обучающийся должен в соответствии с g_j, S_j, ω_l выбрать элемент r_k
Конструктивный	α_3	Заданы цель g_j, ситуация S_j и условия ω_l, в множестве R нет элемента, соизмеримого с ω_l. Обучающийся должен добавить в множество R новый элемент r_k, соизмеримый с ω_l
Творческий	α_4	Заданы цель g_j, на множестве S отсутствует элемент, соизмеримый с элементами множеств R и Ω. Обучающийся должен добавить в множество S новый элемент S_j, а также дополнить множества R и Ω новыми элементами, соизмеримыми с S_j

Современные теории рекомендуют при определении качества усвоения обучающимся навыков и умений при организации ТП использовать следующие показатели: количество и качество приобретенного опыта, а также прочность усвоенного материала [2]–[4].

Качество и количество приобретенного опыта N складывается из учебных элементов по судовождению, включающих в себя управление объектами и процессами:

$$N = n_1 + n_2 + n_3, \tag{7}$$

где $n_1 = card\{\Omega'\}$, $\Omega' \subset \Omega$ — количество учебных элементов, включенных в ТП и усвоенных обучаемым из множества Ω;

$n_2 = card\{R'\}$, $R' \subset R$ — количество учебных элементов, включенных в ТП и усвоенных обучаемым из множества R;

$n_3 = card\{S'\}$, $S' \subset S$ — количество учебных элементов, включенных в ТП и усвоенных обучаемым из множества S

Качество получаемых обучающимися навыков и умений K_α определяется при реализации ТП способностью решать профессиональные задачи по определению порядка действий при управлении сложными техническими и технологическими системами судна. При этом существует два способа использования усвоенной информации:

1-й способ — репродуктивный, когда алгоритмы профессиональной деятельности воспроизводятся обучающимся без изменений и в хорошо известных ему условиях;

2-й способ — продуктивный, когда создается алгоритм с новыми элементами, вводимыми на основе предшествующего опыта.

Качество показателя уровня навыков и умений обучающихся определяется по формуле

$$K_\alpha = \frac{a}{p}, \tag{8}$$

где a — количество правильно выполненных действий в рамках алгоритма операторской деятельности;

p — общее количество действий в алгоритме.

Ясно, что приведенный показатель изменяется в интервале $0 \le K_\alpha \le 1$, а его задание, исходя из опыта, $K_\alpha \ge 0{,}7$.

Эффективность усвоения деятельности проявляется в трех аспектах [2]:

1. Действия выполняются осознанно, т. е. обучающийся обладает умением обосновывать выбор именно данного способа реализации действия в конкретной ситуации, которую он классифицирует по определенному набору признаков γ.

2. Действия выполняются автоматически, т. е. обучающийся овладел навыком выполнения действия за определенное время τ. Минимизация τ осуществляется за счет совершенствования процесса построения ориентировочной основы действия (ООД) и исключения процедур корректировки за счет безошибочного выполнения действий. При этом принято различать действия, допускающие анализ сложившейся ситуации и выбор требуемого способа реализации, и действия, выполняемые автоматически с максимальной скоростью.

3. Действия выполняются на основе хорошо структурированной (обобщенной) информации о сложившейся ситуации, возможном способе реализации действия и условиях. От выбора степени обобщения β информации зависит информационная емкость задачи ТП и покрываемых ею ситуаций, способов и условий ее решения.

Прочность усвоения навыков обучающимся в ходе ТП характеризуется скоростью забывания информации, накопленной в его «долговременной» памяти. Для оценивания прочности усвоения деятельности необходимо проведение эксперимента через Δt после окончания решения конкретной задачи ТП. Оценивание результатов тестового контроля базируется на определении:

$$a_i = \begin{cases} 1 \text{ — при правильном ответе на } i\text{-тест;} \\ 0 \text{ — при неправильном ответе.} \end{cases} \tag{9}$$

где a_i — результат теста i через Δt, $i = \overline{i},\ \overline{n}$.

Виды показателей, оценивающих эффективность усвоения обучающимся деятельности по судовождению в ходе ТП, представлены в табл. 2.

Таблица 2

Виды показателей для оценивания эффективности усвоения деятельности

Содержание и граница показателя	Вид показателя
Осознанность выполнения действий, $0 \le K_\gamma \le 1$	$K_\gamma = \dfrac{\text{card}\{S_j'\}}{\text{card}\{S_j''\}}$, где card $\{S_j'\}$ — мощность множества ситуаций, являющихся для обучающихся значимыми для j-й ситуации; card $\{S_j''\}$ — мощность множества всех значимых для j-й ситуации признаков.
Освоенность (автоматизация) выполнения действий, $0 \le K_\tau \le 1$	$K_\tau = \begin{cases} 1, \text{ при } S_j \subset S',\ r_k \notin R,\ v_l = \Omega; \\ 0{,}5, \text{ при } S_j \notin S',\ r_k \notin R,\ v_l = \Omega, \end{cases}$ где $S' \subset S$ — множество ситуаций, требующих немедленного выполнения действий.
Обобщенность (синтезирование) выполнения действий, $0 \le K_\beta \le 1$	$K_\beta = \dfrac{\left(\lvert\Omega\rvert - \lvert\Omega_0\rvert\right) + \left(\lvert R\rvert - \lvert R_0\rvert\right) + \left(\lvert S\rvert - \lvert S_0\rvert\right)}{\left(\lvert\Omega\rvert - 1\right) + \left(\lvert R\rvert - 1\right) + \left(\lvert S\rvert - 1\right)}$, где Ω, R, S — соответственно множества условий, способов и признаков ситуаций до введенного обобщения; Ω_0, R_0, S_0 — соответственно множества условий, способов и признаков ситуаций после введенного обобщения.

Пусть результат тестового контроля $A = \sum_{i=1}^{n} a_j$, а скорость забывания информации может быть определена из отношения

$$C_{\text{ТК}} = \frac{A}{A'} = \frac{\sum_{i=1}^{n} a_j}{\sum_{i=1}^{n} a_j'}, \qquad (10)$$

где A' — результат тестового контроля при $\Delta t = 0$.

Введение показателей K, N, K_α, K_γ, K_τ, K_β и $C_{\text{ТК}}$ позволяет:

− избежать нечеткости формулировки целей ТП, определить переход от качественного описания к количественному;

− определить качество ТП;

− согласовать цели, структуру, технологии и содержание ТП;

− сравнить различные программы ТП и дидактические подсистемы СОУ ТП;

− выбрать единый методический подход для использования различных методов, средств и организационных форм реализации мероприятий ТП.

Модель обучающегося, кроме отражения процесса выработки требуемых умений и навыков и их уровня (эффективности усвоения деятельности), должна отражать уровень формирования его заданных личностных характеристик. Применительно к целям управления эффективностью ТП целесообразно рассматривать следующие личностные характеристики обучающегося:

− профессиональную направленность на операторскую деятельность и овладение специальностью определенного профиля (СОП);

− наличие и развитие профессионально важных качеств (ПВК), т. е. индивидуально-психологических свойств личности обучающегося (сенсорных, перцептивных, психомоторных, речевых, мыслительных, эмоциональных, волевых), отношение к себе, к профессии, к другим людям, к нравственным и моральным ценностям, оказывающим влияние на успешность овладения профессиональной деятельностью и ее эффективность в процессе судовождения. В процессе ТП происходит формирование и развитие ПВК, а динамика развития позволяет судить об эффективности ТП и уровне сформированности компетенций выпускников выполнять самостоятельно профессиональные задачи по судовождению.

Требования СОП к личности будущего оператора формируются:

− из критериев, состоящих из двух уровней типа *желательно* и *безразлично*;

− из критериев, состоящих из множества уровней типа *желательно*, *нежелательно*, *безразлично*, *степени развития и несовместимости с СОП*;

− из метрических шкал успешности деятельности по развитию ПВК.

Для установления перечня желательных ПВК, как правило, используется экспертный метод, в ходе реализации которого должны быть учтены следующие факторы:

− активность психических функций ПВК в ходе реальной деятельности будущего специалиста по судовождению и продолжительность времени их наибольшей активности;

− реализация психических функций в нетипичных условиях деятельности;

− возможность формирования, развития и тренировки психических функций в ходе реальной деятельности;

− возможность компенсации одних психических функций другими.

Процесс управления эффективностью формирования развития ПВК позволяет осуществить прогноз его результатов методами однофакторного или многофакторного регрессионного анализа. При этом необходимо применение аппарата математической статистики и одного из пакетов прикладных программ: MAPLE (начиная с версии 11), STATGRAPHICS или EXCEL для прогнозирования и оценивания точности прогноза.

Обсуждение результатов (Discussion of Results)

При моделировании процесса ОУ ТП обучающийся рассматривался как *объект управления*, а также отмечалось, что он является и *субъектом управления*, оказывающим прямое воздействие на изменение своих качественных характеристик в ходе ТП. Данное утверждение требует дополнительного включения описаний совокупности приобретаемых в процесс ТП умений и навыков, ведущих к профессиональному и личностному развитию, определяющих способность обучаемых к саморазвитию и позволяющих достичь заданных уровней профессионализма и личностных характеристик для эффективного выполнения профессиональных действий по судовождению. При этом выражение (4) должно быть дополнено вектором степени сформированности способностей к профессиональному саморазвитию в ходе ТП $R_{\text{с}}^{\text{ТП}}$, а результаты ТП должны дополнительно оцениваться $K_{m,\,n}^{\text{с}}$ в соответствии с выражением (5).

Профессиональное саморазвитие — это деятельность, направленная на личностное развитие обучающегося с целью освоения будущей профессии и самореализации в ней как личности. Саморазвитие предполагает также развитие профессиональных качеств, знаний, умений и навыков. Процесс профессионального саморазвития принято разделять на этапы [5]–[8]:

1-й этап — формирование необходимого уровня самосознания;

2-й этап — проведение самооценки, которая включает:

− когнитивность, т. е. оценивание своих способностей, социальной значимости, характера и др.;

− эмоциональность, т. е. оценивание самоуважения, самолюбия, самодостаточности и др.;

− волю, т. е. оценивание своего статуса в коллективе, уважения к себе и другим;

3-й этап — постановка цели саморазвития, которая отражает готовность обучающегося изменять себя в направлении, определяемом будущей профессией;

4-й этап — практическая реализация саморазвития в виде самовыражения, саморегулирования, самоанализа, самоконтроля и самокоррекции.

На процесс профессионального саморазвития действуют две группы факторов:

1-я группа — объективные, к которым относятся:

− управляющие педагогические воздействия руководителя ТП;

− социально-педагогический климат в группе ТП;

− привлечение к решению профессиональных задач по судовождению (практики, стажировки);

2-я группа — субъективные, к которым относятся:

− профессиональная направленность и мотивация;

− адекватность самооценки;

− владение приемами саморазвития.

Целесообразно установить критерии и показатели эффективности профессионального саморазвития, к которым можно отнести следующие:

1. *Содержательно-мотивационный критерий*, включающий в себя цели, задачи и содержание саморазвития, профессиональные компетенции по судовождению, квалификационные требования и мотивацию на профессиональное развитие. Данный критерий предусматривает применение следующих показателей: степени выработки умений и отработки навыков, а также степени выраженности ПВК личности обучающегося.

2. *Организационно-деятельностный критерий*, который отражает принятую организацию саморазвития, его планирование, цели, эмоционально-волевую насыщенность. Показатели, характеризующие степень удовлетворения данному критерию, следующие: уровень выраженной профессиональной направленности; степень профессиональной привлекательности профессии; уровень мотивации на профессиональное развитие; уровень самоорганизации и планирование процесса обучения.

3. *Психотехнический критерий*, отражающий степень владения приемами и методами профессионального саморазвития в ходе ТП. При этом показателями являются: уровень умения владением различными методами и приемами саморазвития, способность преодолевать трудности на пути профессионального саморазвития и достигать его цели.

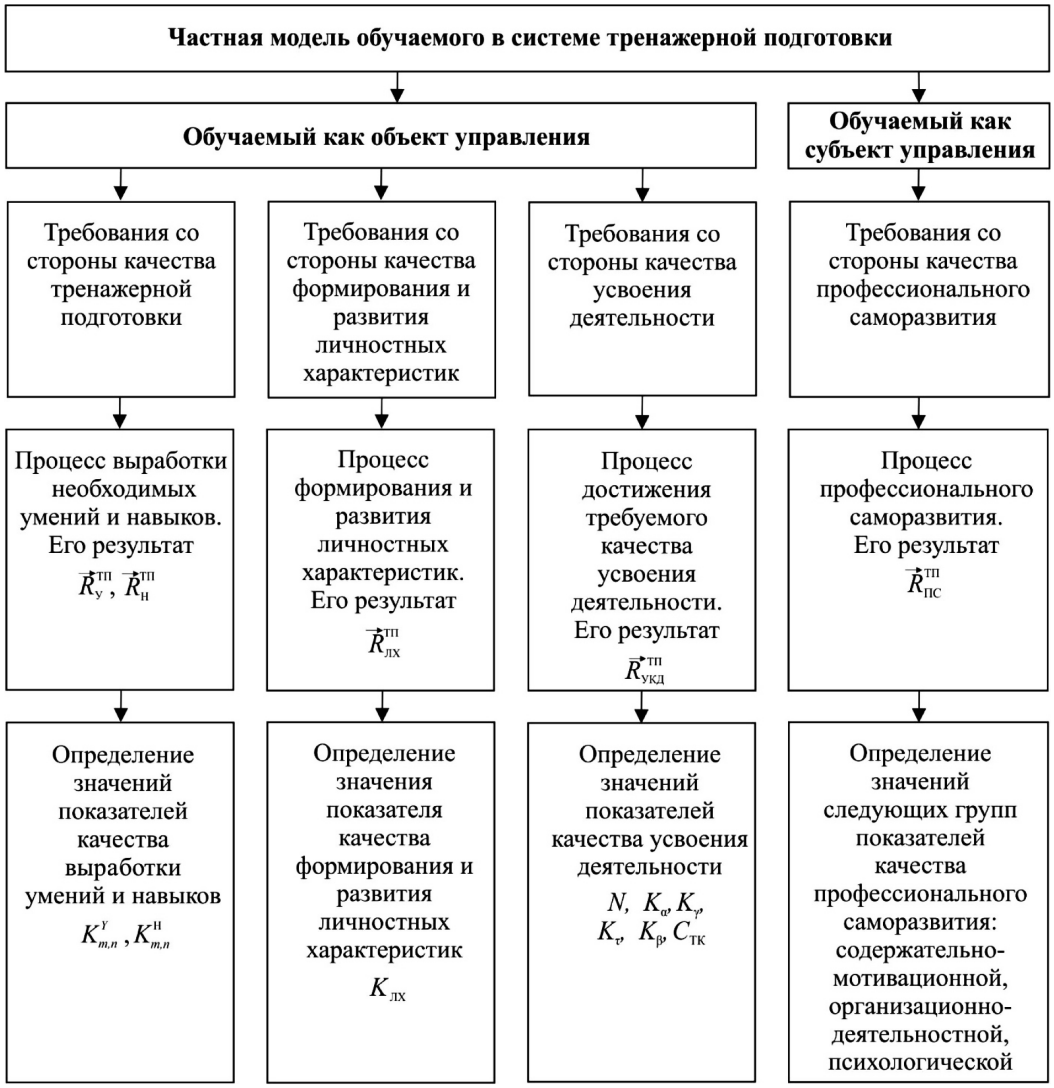


Рис. 2. Структурно-функциональная модель обучающегося в системе тренажерной подготовки

Принято рассматривать три уровня активации профессионального саморазвития. Первым уровнем является такой, в рамках которого отсутствуют четко поставленные цели на активизацию профессионального саморазвития обучающихся в ходе ТП со стороны руководителя, он является фронтальным (без персонификации). Второй уровень является целенаправленным с фронтальной активизацией обучающихся группы ТП. Руководитель ТП должен информировать обучающихся о реальных требованиях к специалисту по судовождению, формировать образ идеального профессионала, принимать меры по стимулированию обучающихся к саморазвитию. Недостатком является слабая обратная связь из-за фронтального воздействия. На третьем уровне активизация профессионального саморазвития должна осуществляться на основе целенаправленного педагогического руководства в сочетании с индивидуальным подходом. Для этого уровня необходимы:

− высокое педагогическое мастерство и личные качества руководителя ТП;

− четкая постановка целей и задач профессионального саморазвития на фронтальном и индивидуальном направлениях;

− использование прямых и косвенных средств активизации профессионального саморазвития;

− наличие обратных связей для контроля хода профессионального саморазвития обучающихся и оказания им педагогической помощи.

Построена частная модель обучающегося в системе ТП (рис. 2), действующего в рамках дидактической подсистемы СОУ ТП и подверженного двум видам управляющих воздействий: со стороны руководителя ТП и самоуправление. На этой основе сформирована модель познавательной деятельности обучающегося, которая послужила базой построения структурно-функциональной модели обучающегося, осуществляющего ТП. Эта модель включает описание совокупности умений и навыков, вырабатываемых в ходе ТП, а также совокупности личностных характеристик, дополняющих умения и навыки. Определены виды векторных показателей, характеризующих результаты выработки умений, навыков и личностных характеристик.

Выводы (Summary)

В результате проведенного исследования можно сделать следующие выводы:

1. Определено, что деятельность специалиста по судовождению характеризуется целями, ситуациями, способами выполнения и условиями.

2. На основании норм педагогики установлены четыре уровня усвоения деятельности по судовождению обучающимся: операционный, функциональный, конструктивный и творческий. Определен набор показателей, характеризующий достигнутый обучающимся уровень усвоения деятельности: широта опыта, качество усвоения деятельности (осознанное, автоматическое, обобщенное), прочность усвоения. Определен перечень личностных характеристик, которые должны быть выработаны обучающимся в ходе ТП.

3. Поскольку обучающийся осуществляет саморазвитие в ходе ТП, его модель дополнена описанием самостоятельных усилий по формированию профессиональных умений и навыков и выработке личностных характеристик. Определены две группы факторов: объективные и субъективные. Установлены критерии (содержательно-мотивационный, организационно-деятельностный и психотехнический) и показатели эффективности профессионального саморазвития обучающегося.

4. При реализации структурно-функциональной модели обучающегося в системе тренажерной подготовки для повышения качества саморазвития необходимо создать условия для освоения обучающимся части образовательной программы удаленно, в том числе на судах. Для этого, например, можно использовать электронную информационно-образовательную среду [9]. Внедрение электронного обучения и дистанционных образовательных технологий позволит создать возможность для предварительного теоретического изучения методов и моделей, в том числе для безопасного судовождения [10]–[16], и эффективного выполнения профессиональных действий по судовождению непосредственно на тренажерах.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Сметюх Н. П.* Многофункциональные виртуальные тренажеры для подготовки экипажей судов рыбопромыслового флота: дис. … канд. техн. наук; специальность 05.13.06 / Н. П. Сметюх. — СПб.: НИУ ИТМО, 2017. — 185 с.

2. *Алексеева Е. К.* Задача агрегирования частных показателей качества объектов в интегральный показатель качества системы тренажерной подготовки специалистов по судовождению / Е. К. Алексеева, С. А. Алексеев // Журнал Университета водных коммуникаций. — 2013. — № 3. — С. 109–115.

3. *Сметюх Н. П.* Разработка адаптивной компьютеризированной системы обучения специалистов водного транспорта в процессе промысла / Н. П. Сметюх // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2016. — № 3 (37). — С. 217–227. DOI: 10.21821/2309-5180-2016-7-3-217-227.

4. *Lisitsyna L. S.* Models and Methods for Adaptive Management of Individual and Team–Based Training Using a Simulator / L. S. Lisitsyna, N. P. Smetyuh, S. P. Golikov // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. — IOP Publishing, 2017. — Vol. 66. — Pp. 012010. DOI: 10.1088/1755-1315/66/1/012010.

5. *Кузьмина Н. В.* Профессионализм деятельности преподавателя / Н. В. Кузьмина. — М.: Высш. шк., 1989. — 166 с.

6. *Кузьмина Н. В.* Профессионализм педагогической деятельности / Н. В. Кузьмина, А. А. Реан. — СПб.: МААН, 1993. — 54 с.

7. *Талызина Н. Ф.* Теоретические основы разработки модели специалиста / Н. Ф. Талызина. — М.: Знание, 1986. — 108 с.

8. *Талызина Н. Ф.* Управление процессом усвоения знаний / Н. Ф. Талызина. — М.: Изд-во МГУ, 1984. — 345 с.

9. *Kovalnogova N.* Process model development of educational programs using e-learning and distance learning technologies / N. Kovalnogova, S. Sokolov, A. Nyrkov // Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering Conference (EIConRusNW), 2016 IEEE NW Russia. — IEEE, 2016. — Pp. 817–819. DOI:10.1109/EIConRusNW.2016.7448310.

10. *Ныркова А. П.* Алгоритм управления движением судов, идущих пересекающимися курсами / А. П. Ныркова, П. В. Викулин // Журнал Университета водных коммуникаций. — 2011. — № 1. — С. 100–105.

11. *Гриняк В.М.* Разработка математических моделей обеспечения безопасности коллективного движения морских судов: дис. … д-р техн. наук; специальность 05.13.18 / В. М. Гриняк. — Владивосток, 2017. — 297 с.

12. *Ныркова А. П.* Математическая модель резервирующей системы и оптимизация ее работы / А. П. Ныркова, Т. В. Дмитриева // Журнал Университета водных коммуникаций. — 2011. — № 2. — С. 98–101.

13. *Ныркова А. П.* Программно-аппаратная реализация системы предупреждения аварийной ситуации для объектов морского транспорта / А. П. Ныркова [и др.] // Автоматизация в промышленности. — 2016. — № 2. — С. 56–60.

14. *Черный С. Г.* Задача создания системы управления рисками для сложных систем морских платформ / С. Г. Черный // Оборудование и технологии для нефтегазового комплекса. — 2016. — № 1. — С. 55–61.

15. *Churkin V. I.* Procedures for ship collision avoidance / V. I. Churkin, Yu. I. Zhukov // OCEANS'98 Conference Proceedings. — IEEE, 1998. — Vol. 2. — Pp. 857–860. DOI: 10.1109/OCEANS.1998.724360.

16. *Hwang C. N.* The integrated design of fuzzy collision-avoidance and h1-autopilots on ships / C. N. Hwang // The Journal of navigation. — 2002. — Vol. 55. — Is. 1. — Pp. 117–136. DOI: 10.1017/S0373463301001631.

REFERENCES

1. Smetyuh, N. P. Mnogofunkcionalnye virtualnye trenazhery dlja podgotovki ekipazhei sudov rybopromyslovogo flota. PhD diss. SPb.: NIU ITMO, 2017.

2. Alekseeva, E. K., and S. A. Alekseev. "Aggregation of the specific quality indicators of an object in a combined indicator of quality of simulator training system for navigation specialists." *Zhurnal Universiteta vodnykh kommunikatsii* 3 (2013): 109–115.

3. Smetuh, Nadezhda Pavlovna. "Development of adaptive computerized training system of specialists of water transport in the process of fishing" *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova* 3(37) (2016): 217–227. DOI: 10.21821/2309-5180-2016-7-3-217-227.

4. Lisitsyna, L. S., N. P. Smetyuh, and S. P. Golikov. "Models and Methods for Adaptive Management of Individual and Team-Based Training Using a Simulator." *IOP Conference Series: Earth And Environmental Science*. Vol. 66. No. 1. IOP Publishing, 2017. DOI: 10.1088/1755-1315/66/1/012010.

5. Kuz'mina, N. B. *Professionalizm deyatel'nosti prepodavatelya*. M.: Vysshaya shkola, 1989.

6. Kuz'mina, N. V., and A. A. Rean. *Professionalizm pedagogicheskoi deyatel'nosti*. SPb.: MAAN, 1993.

7. Talyzina, N. F. *Teoreticheskie osnovy razrabotki modeli spetsialista*. M.: Znanie, 1986.

8. Talyzina, N. F. *Upravlenie protsessom usvoeniya znanii*. M.: Izd-vo MGU, 1984.

9. Kovalnogova, N., S. Sokolov, and A. Nyrkov. "Process model development of educational programs using e-learning and distance learning technologies." *Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering Conference (EIConRusNW), 2016 IEEE NW Russia*. IEEE, 2016. 817–819. DOI: 10.1109/EIConRusNW.2016.7448310.

10. Nyrkov, A. P., and P. V. Vikulin. "Algorithm of management of the ships movement, when its courses intersect." *Zhurnal Universiteta vodnykh kommunikatsii* 1 (2011): 100–105.

11. Grinjak, V. M. Razrabotka matematicheskih modelei obespechenija bezopasnosti kollektivnogo dvizhenija morskih sudov. Dr. diss. Vladivostok, "Institut avtomatiki I processov upravlenija DVO RAN" 2017.

12. Nyrkov, A. P., and T. V. Dmitrieva. "Mathematical model of the reserving system and the optimization of its work." *Zhurnal Universiteta vodnykh kommunikatsii* 2 (2011): 98–101.

13. Nyrkov, A. P., S. S. Sokolov, A. A. Zhilenkov, and S.G. Chernyi. "Programmno-apparatnaja realizacija sistemy preduprezhdenija avariinoi situacii dlja obiektov morskogo transporta." *Avtomatizatsiya v Promyshlennosti* 2 (2016): 56–60.

14. Cherny, Sergey Grigorievich. "Development of the risk management system for complex systems of offshore platforms." *Oborudovanie i tehnologii dlya neftegzovogo kompleksa* 1 (2016): 55–61.

15. Churkin, Vladimir I., and Yuri I. Zhukov. "Procedures for ship collision avoidance." *OCEANS'98 Conference Proceedings*. Vol. 2. IEEE, 1998. 857–860. DOI: 10.1109/OCEANS.1998.724360.

16. Hwang, Cheng-Neng. "The integrated design of fuzzy collision-avoidance and H∞-autopilots on ships." *The Journal of navigation* 55.1 (2002): 117–136. DOI: 10.1017/S0373463301001631.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

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

Алексеев Сергей Алексеевич —
доктор технических наук, старший научный
сотрудник
Санкт-Петербургский университет МВД России
198206, Санкт-Петербург,
ул. Летчика Пилютова, 1
e-mail: *ksgati@yandex.ru*

Стахно Роман Евгеньевич —
кандидат технических наук
Санкт-Петербургский университет МВД России
198206, Санкт-Петербург,
ул. Летчика Пилютова, 1
e-mail: *piter_rus@mail.ru*

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

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

Alekseev, Sergey A. —
Dr. of Technical Sciences,
senior researcher
St. Petersburg University of the Ministry
of Internal Affairs of Russia, 1 Pilyutova Str.,
St. Petersburg, 1198206, Russian Federation
e-mail: *ksgati@yandex.ru*

Stahno, Roman E. —
PhD
St. Petersburg University of the Ministry
of Internal Affairs of Russia, 1 Pilyutova Str.,
St. Petersburg, 1198206, Russian Federation
e-mail: *piter_rus@mail.ru*

Статья поступила в редакцию 29 ноября 2018 г.
Received: November 29, 2018.

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

DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-6-1299-1311

FORECASTING OF THE EVOLUTION OF SEA PASSENGER TERMINALS AND NETWORK OF FERRY LINES IN THE REGION OF THE BALTIC SEA

N. N. Maiorov

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

Due to the geographical proximity of countries of the Baltic region, passenger and related cargo and passenger shipping on the Baltic Sea act as the backbone elements of both the transport infrastructure and the Baltic transnational macroregion. In an effort to answer the questions of forecasting development, determining growth points, modeling and simulation the mutual influence of passenger terminals, it is necessary to apply a technical systems approach based on both retrospective analysis and a large amount of statistical data. Of particular importance is the study of the interaction of the systems "marine passenger terminal - ferry / cruise line". Solving this problem by analyzing statistical data, or making a forecast based on the theory of decision making under conditions of uncertainty for the macro level, will not lead to a positive, accurate result. To solve short-term forecasting problems, the class of polynomial problems has proven itself well, but as the planning horizon increases, it is necessary to raise the question of forecasting accuracy. The complexity of the forecast is determined by the complex nature of accounting for the external environment, which must be included in mathematical models. Determining the current state of ferry transportation is impossible without a retrospective analysis, which allows you to determine the mechanisms for managing systems. The object of the analysis was selected Russian sea ferry networks and passenger terminals. A retrospective analysis was performed and graphical dependencies were built reflecting the development potential. The analysis of the route ferry network of the Baltic region countries in the selected time interval was carried out and a new use of circular diagrams of intensity links was proposed. The use of this new toolkit for ferry transportation allows analyzing the mutual influence of the terminals on each other, creates a basis for making decisions on changes for the entire transportation market at the macro level. On the basis of the analysis performed, the forecasting problem was solved and sections of the Baltic Sea and passenger terminals located in which there would be an even greater increase in the intensity of both ferry and cruise lines.

Keywords: sea passenger terminal, forecasting, ferry transportation, objective function, circular diagrams of intensity links, ferry line.

For citation:
Majorov, Nikolaj N. "Forecasting of the evolution of sea passenger terminals and network of ferry lines in the region of the Baltic sea." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 10.6 (2018): 1299–1311. DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-6-1299-1311.

УДК 65.012.1, 656.072

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ РАЗВИТИЯ МОРСКИХ ПАССАЖИРСКИХ ТЕРМИНАЛОВ И СЕТИ ПАРОМНЫХ ЛИНИЙ В РЕГИОНЕ БАЛТИЙСКОГО МОРЯ

Н. Н. Майоров

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

Ввиду близости стран Балтийского региона пассажирские и сопутствующие грузопассажирские морские перевозки на Балтийском море являются системообразующими элементами как транспортной инфраструктуры, так и Балтийского транснационального макрорегиона. В процессе ответа на вопрос о прогнозе развития, определении точек роста, а также о моделировании взаимного влияния пассажирских терминалов необходимо применять технический системный подход, основанный как на ретроспективном анализе, так и на большом количестве статистических данных. Особую значимость при этом приобретает исследование взаимодействия систем «морской пассажирский терминал – паромная / круизная линия». Решение данной задачи путем анализа статистических данных или формирования прогноза

на основе теории принятия решений в условиях неопределенности для макроуровня не приведет к положительному точному результату. Для реализации задач краткосрочного прогнозирования положительно себя зарекомендовал класс полиномиальных задач, однако при увеличении горизонта планирования необходимо решать вопрос о точности прогнозирования. Сложность прогноза определяется непростым характером учета внешней среды — вопросом, который необходимо включать в математические модели. Определение современного состояния паромных перевозок является невозможным без проведения ретроспективного анализа, который позволяет определить механизмы управления системами. Объектом анализа выбраны российские морские паромные сети и пассажирские терминалы. Выполнен ретроспективный анализ и построены графические зависимости, отражающие потенциал развития. Выполнен анализ маршрутной паромной сети стран Балтийского региона в выбранном временном интервале и предложено новое использование круговых диаграмм связей интенсивностей. Использование данного нового инструментария для паромных перевозок позволяет анализировать взаимное влияние терминалов друг на друга, служит основанием для принятия решений по изменению всего рынка перевозок на макроуровне. На основе выполненного анализа решена задача прогнозирования, а также определены участки Балтийского моря и расположенных пассажирских терминалов, в которых будет предусмотрено еще большее увеличение интенсивности как паромных, так и круизных линий.

Ключевые слова: морской пассажирский терминал, прогнозирование, паромные перевозки, целевая функция, круговые диаграммы связей интенсивностей, морская паромная линия.

Для цитирования:
Майоров Н. Н. Прогнозирование развития морских пассажирских терминалов и сети паромных линий в регионе Балтийского моря / Н. Н. Майоров // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2018. — Т. 10. — № 6. — С. 1299–1311. DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-6-1299-1311.

Введение (Introduction)

Современные мировые процессы оказывают непосредственное влияние как на развитие, так и на изменение роли морских портов, терминалов и транспортных грузопассажирских систем. Особую актуальность вопросы развития и прогнозирования приобретают в таких регионах, как Балтийское море [1]. Регион Балтийского моря крайне разнообразен в смысле транспортной инфраструктуры, экономики, окружающей среды и культуры, однако страны во многих случаях используют общие (совместные) ресурсы и являются взаимозависимыми. При этом пассажирские и сопутствующие грузопассажирские морские перевозки на Балтийском море выступают как системообразующие элементы Балтийского транснационального макрорегиона. Если рассматривать сегмент пассажирских паромных перевозок, то в начале 1990-х гг., во время стабильной работы Балтийского морского пароходства, их выполняли такие суда, как «Анна Каренина», паромы «Ильич» и «Константин Симонов», «Михаил Калинин». С начала до середины 90-х гг. XX в. теплоход «Анна Каренина» курсировал на маршруте Ленинград (ныне Санкт-Петербург) – Нунесхамн (Швеция) – Киль (Германия). Паром «Ильич» соединял города Ленинград и Стокгольм, паром «Константин Симонов» — города Ригу и Хельсинки. Наиболее современным в указанный период времени было судно «Анна Каренина» [2]. В частности, в источнике [3] содержится информация о том, что для комфортного пребывания пассажиров на борту этого судна был обустроен «зимний сад с соловьями». Основные характеристики судна «Анна Каренина» следующие: тоннаж 13878 т, дедвейт 2830 т, длина 145,19 м, ширина 25,51 м, осадка 5,52 м, скорость хода 21,3 уз, судно имеет 12 палуб, вместимость 1500 пассажиров и 462 легковых автомобиля.

Рассмотрим фрагментарно другие пассажирские и грузопассажирские паромы, относящиеся к Балтийскому морскому пароходству (БМП). После банкротства БМП [4] в 1996 г. паром «Ильич» был продан дочерней компании Nordström & Thulin (Швеция) и ESCO (Эстония) — Estline (для обслуживания линии Таллинн – Стокгольм) и переименован в «Regina Baltica». По настоящее время паром выполняет регулярные маршруты, портом его приписки является г. Рига, владельцем — компания Tallink Grupp AS. Помимо пассажирских перевозок судно «Анна Каренина» было зафрахтовано Российской армией в 1991 г. для транспортировки войск из бывшей Восточной Германии.

Паромное судно «Константин Симонов» (серийный проект «В-492» [2]), построенное в апреле 1982 г. по заказу Советского Союза как морской автопассажирский паром, проработало на линии: Ленинград – Хельсинки – Петербург до 1996 г. С 2010 по 2014 гг. портом приписки этого судна являлся г. Котка (Финляндия). Основные характеристики судов данной серии следующие: пассажировместимость каждого теплохода составляла 496 человек с размещением в каютах по два и по четыре пассажира, автопалуба могла принять до 118 легковых автомобилей. Данное судно приобрела финская компания Kristina Cruises и оно получило новое название Kristina Cruises, которое сохранилось до настоящего времени.

Паромное судно «Георг Отс» (серийный проект «В-493») изначально было передано Эстонскому пароходству [5]. Исторически это судно было первым грузопассажирский паромом, построенным в Польше для советских операторов Baltic Line. В 1980–2000 гг. на Балтике паром обслуживал маршрут Таллин – Хельсинки. В 1994 г. судно было зафрахтовано компанией Tallink, 45 % акций которой в то время принадлежало компании ESCO), при этом оно продолжало обслуживать маршрут Таллин – Хельсинки [6]. В 2002 г. паром был продан Российской Федерации и с 2003 г. он обслуживал маршрут Балтийск (Калининград) – Санкт-Петербург. С 2011 г. паром был приписан к порту Владивосток. Следует отметить, что он стал первым пассажирским судном-неледоколом, преодолевшим Северный морской путь с ледокольной поддержкой. На его смену на маршруте Калининград – Санкт-Петербург вышли грузопассажирские паромы «Петербург», «Балтийск», и грузовой паром «Амбал» [7]. Сейчас эти паромы работают на маршруте Усть-Луга – Калининград. В 1986 г. паром «Петербург» являлся самым большим двухпалубным железнодорожным паромом мира. После перестройки в 1995 г. он был переименован в «Petersburg». В 1985 г. это судно начало эксплуатироваться на первой немецкой паромной линии между гг. Травемюнде и Санкт-Петербург. В последующие годы судно эксплуатировалось на различных паромных линиях в Балтийском море, например, Клайпеда – Травемюнде – Мукран – Киль. В октябре 2014 г. паром «Petersburg» открыл новую линию для перевозок пассажиров и грузов между гг. Новороссийск – Севастополь, а с 2015 г. он вернулся на Балтику. Согласно официальным данным оператора ООО «Логистика» [7], паром временно снят с маршрута с апреля 2018 г.

Паромы «Балтийск» и «Амбал» 1984 г. постройки являются «близнецами». Начиная с ноября 1984 г. они эксплуатировались на линии Травемюнде – Ханко. В 2006 г. паром «Балтийск» вышел сначала на линию Санкт-Петербург – Любек, а сейчас работает на линии Усть-Луга – Балтийск – Засниц. Также в его маршрутной сети участвуют порты Засниц (Германия) и Клайпеда (Литва). В период 29.10.2018 г. – 30.11.2018 г., согласно расписанию, размещенному на официальном сайте компании Trans-Exim (г. Калининград), паром «Балтийск» выполнял перевозки в течение пяти раз, длительность его в пути составила четыре дня, включая как день отправления, так и день прибытия.

Необходимо отметить выпуск серии паромных судов (ролкеров) «Проект 161» (ГДР), получившей название «Композиторы» в честь головного судна, которое называлось «Композитор Кара-Караев». Все остальные суда серии, за исключением последнего, были также названы в честь великих русских композиторов [8]: «Композитор Глинка», «Композитор Даргомыжский», «Композитор Бородин», «Композитор Мусоргский», «Композитор Чайковский», «Композитор Рахманинов», «Композитор Римский-Корсаков», «Композитор Новиков» и «Николай Чернышевский». Выпуск судов этой серии отличался увеличением грузооборота и высокой потребностью в перевозке транспортной автотехники. Многие ролкеры имеют собственный парк специальной перегрузочной техники, что позволяет значительно ускорить процесс разгрузки судна. Обработка грузов на ролкерах осуществляется при помощи грузовой рампы, которая соединяет судно с причалом.

В Балтийском море регулярные маршруты в период 1997–2004 гг. выполняло паромное судно «Композитор Мусоргский». В большинстве своем оно осуществляло перевозку грузов на колесной базе (автомобили, грузовой транспорт) и пассажиров, а также выполняло воинские перевозки. Судно выполняло регулярные рейсы на маршруте Санкт-Петербург – Котка (Финляндия) – Калининград – Росток (Германия) и на маршруте Санкт-Петербург – Рига (Латвия) –

Гданьск (Польша) – Санкт-Петербург. Судно имело максимальную загруженность и не простаивало. В настоящее время из десяти судов осталось четыре: «Композитор Кара Караев» («Bestekar Gara Garayev»), «Композитор Глинка» («Bastakar Fikret Amirov») — находятся в эксплуатации в Каспийском море в Азербайджанском морском пароходстве, а также «Композитор Рахманинов» («Kompozitor Rakhmaninov») и «Композитор Гасанов» («Kompozitor Gasanov»), которые под флагом Российской Федерации совершают рейсы в порты Черного и Средиземного морей).

Сегодня на рынке паромных перевозок действует паром «Принцесса Анастасия» (SPL «Princess Anastasia», 1986 г. постройки) компании St. Peter Line и оператора Moby S.p.A. До недавнего времени на маршрутах работал паром такого же класса «Принцесса Мария» («Princess Maria»). Паром «Принцесса Анастасия» с декабря 2010 г. курсировал на маршруте Стокгольм – Таллин – Санкт-Петербург. В 2011 г. был введен недельный маршрут Санкт-Петербург – Таллин – Стокгольм – Санкт-Петербург – Хельсинки – Мариехамн – Стокгольм – Таллин – Санкт-Петербург, в связи с заинтересованностью эстонских туристов в посещении Санкт-Петербурга. Для плавания по маршруту Санкт-Петербург – Хельсинки – Санкт-Петербург тогда же было направлено паромное судно «Принцесса Мария» (1981 г. постройки). С февраля 2012 г. паромы «St. Peterline» швартуются в Западном терминале (Länsiterminaali) г. Хельсинки. Кроме того, оператор перешел на новый принцип формирования расписания по скользящему графику, без привязки к дням недели. Из Санкт-Петербурга паром отправляется через день. С 20 февраля 2012 г. заходы в г. Таллинн были отменены. С ноября 2016 г. название судна «Принцесса Мария» было изменено на «Moby Dada», изменились также порт приписки и владелец судна. Сегодня судно «Принцесса Анастасия» выполняет около восьми рейсов в месяц по двум направлениям и является единственным пассажирским паромом общей пассажировместимостью 2500 мест (834 каюты) с автомобильной палубой на 580 машин. В течение 2017 г. на пароме было перевезено 312 тыс. человек, что является достаточно хорошим показателем его работы.

Любой пассажирских терминал является центром притяжения пассажиропотоков. Ретроспективно первым пассажирским терминалом в Санкт-Петербурге является «Морской вокзал» [9], который был открыт в 1982 г. в качестве специализированного терминала по приему и обработке круизных и паромных грузопассажирских судов. В 2003 – 2010 гг. с терминала «Морской вокзал» регулярно в г. Калининград паром «Георг Отс». Сегодня терминал «Морской вокзал» является местом отправления / прибытия парома «Принцесса Анастасия» (Санкт-Петербург – Хельсинки – Стокгольм – Таллин – Санкт-Петербург) компании St. Peter Line. В Санкт-Петербурге пассажирские терминалы находятся в самом центре города — на Английской набережной и набережной Лейтенанта Шмидта. Пассажирские пункты для круизных судов были открыты в конце 1980-х гг. Предполагалось, что они будут временным сооружением, однако эти пассажирские пункты работают до сих пор, активно принимая современные круизные суда и, из-за близости к центру города, имеют большую популярность. Ввиду того, что на рубеже 1990-х гг. пассажирские пункты были модернизированы, для построения графика количества терминалов в г. Санкт-Петербурге было принято решение об объединении обоих причалов в один для построения графика функции. Кроме того, в период 2005–2008 гг. было завершено строительство пассажирского порта Санкт-Петербург «Морской фасад» [10], являющегося единственным в Северо-Западном регионе России специализированным пассажирским портом. Однако на данный момент этот терминал не может принимать грузовые паромы, так как пока еще не завершены работы по вводу соответствующего терминала, и сейчас он сосредоточен только на обработке круизных судов.

На основе выполненного анализа можно представить следующие графики функций развития системы паромного сообщения и пассажирских портов для г. Санкт-Петербурга (рис. 1). Приведенные на этом рисунке статистические данные свидетельствуют о количестве как пассажирских причалов и терминалов (см. рис. 1, *а*), так и грузопассажирских паромов (см. рис. 1, *б*). Если рассматривать только пассажирские перевозки, то на данный момент по сравнению с 1990-ми гг. произошло уменьшение их в четыре раза, что напрямую свидетельствует об уменьшении маршрутной сети и присутствии на рынке перевозок. Как отмечалось ранее, в начале 1990-х гг. регу-

лярные пассажирские рейсы выполняло четыре парома. В настоящее время из Санкт-Петербурга пассажирские рейсы выполняет один пассажирский паром «Принцесса Анастасия» (SPL «Princess Anastasia»), грузовые перевозки на направлении Усть-Луга – Калининград сегодня выполняют два парома.

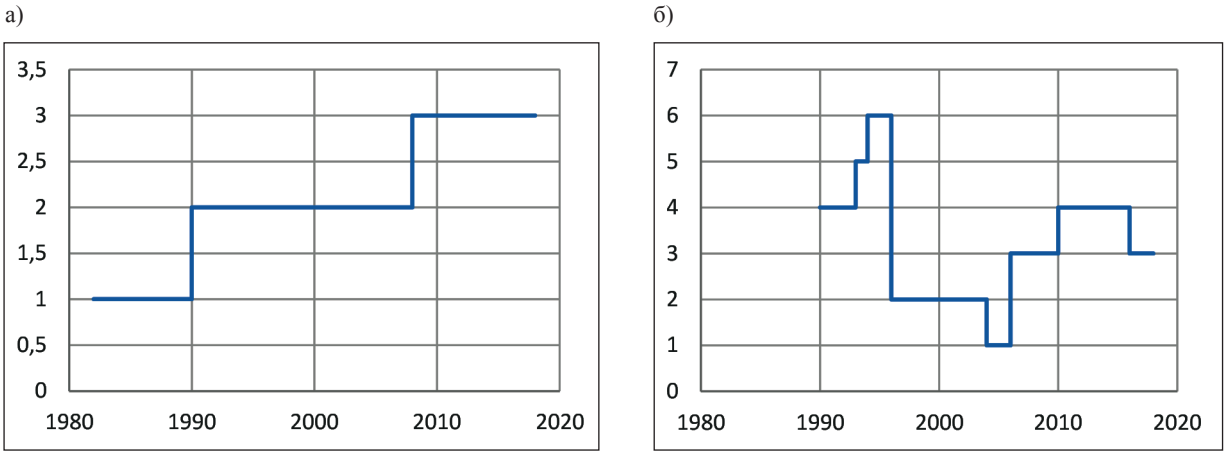


Рис. 1. Динамика ввода в эксплуатацию пассажирских причалов и терминалов (*а*) и развития паромного сообщения на Балтике (*б*) в период 1980 – 2018 гг.

Исторический анализ свидетельствует о том, что на момент времени существования БМП паромное сообщение в структуре пароходства было прибыльным, так как и пассажирская, и грузовая палубы были заполнены на 80 % [2], что даже при относительно низких ценах давало немалые доходы. После банкротства БМП в середине 1990-х гг. ситуация кардинально изменилась. Многие пассажирские суда были арестованы за границей и впоследствии проданы, а регулярное паромное сообщение между Санкт-Петербургом и городами Европы прервалось. Многие из них после модернизации работают и сегодня, выполняя регулярные перевозки. Для Санкт-Петербурга в момент банкротства БМП рынок постарались заполнить другие перевозчики. Так, в 2004 – 2005 гг. эстонская компания Tallink (современное название Tallink Silja) и финская компания Silja Line запустили несколько линий из Санкт-Петербурга, но ни одна из них на тот момент в связи со сложной экономической ситуацией не просуществовала более двух лет. В настоящее время парк паромов российского сектора на Балтике состоит из одного пассажирского судна и двух грузопассажирских паромов.

С точки зрения ввода пассажирских терминалов, ситуация выглядит более положительной. Сегодня в Санкт-Петербурге находится самый большой пассажирский терминал на Балтике, который позволил сформировать точку роста туристического потока в регионе. Интенсивность судозаходов и пассажиропотока в порту «Морской фасад» в 2012– 2017 гг. приведены в табл. 1.

Таблица 1

Интенсивность судозаходов и пассажиропотока в порту «Морской фасад» в период 2012–2017 гг.

Показатель	2012 г.	2013 г.	2014 г.	2015 г.	2016 г.	2017 г.	2017 г. в % к 2016 г.
Количество судозаходов, ед., в том числе:	226	261	239	230	209	244	↑+16,7
круизные суда	221	249	234	223	209	247	↑+18,2
паромные суда	5	12	5	7	-	2	рост
Пассажиропоток, тыс. чел., в том числе:	422	504	483	493	456	563	↑+23,5
пассажиры круизных судов	411	483	473	482	456	558	↑+22,4
пассажиры паромных судов	11	21	10	10	-	5	рост

Методы и материалы (Methods and Materials)

Основные тенденции паромных линий в Балтийском море. Ретроспективно период 50–60-х гг. XX в. охарактеризован бурным ростом перевозок как линейного, так и круизного характера. Автопассажирские паромы обеспечивали перевозку больших транзитных потоков автотуристов, предоставляя им возможность проведения длительных круизов с береговыми экскурсиями в портах захода. В 1960 г., согласно источнику [2], автопассажирские паромы составляли лишь 13 % от всех построенных в мире пассажирских судов, а к началу 1990-х гг. их доля возросла до 89 %. Сегодня данная тенденция является трендом в строительстве мегакруизных лайнеров, что вынуждает вносить обновления в портовую инфраструктуру для того, чтобы такое судно могло пришвартоваться на пассажирском терминале.

В настоящее время можно выявить следующие тенденции в развитии паромных перевозок и круизных перевозок:

1. Происходят изменения численности паромов, которые обусловлены в основном экономическими факторами, и наблюдается временная стабилизация численности паромов. Для круизных лайнеров, наоборот, наблюдается тенденция к включению их в маршруты портов Балтийского региона, обусловленная культурно-историческими объектами.

2. На Балтике количество паромов на линии практически не превышает двух, а количество портов заходов составляет от двух до четырех.

3. Происходит укрупнение паромов, увеличиваются их пассажиро- и грузовместимость.

4. Происходит возрастание комфортабельности паромов до уровня круизных лайнеров. На Балтике около 60 % пассажиров, как правило, совершают поездки на паромах с целью отдыха и только затем передвижения.

5. С учетом увеличивающейся пассажировместимости паромов меняется суть их работы. От первоначальных установок быстрого достижения другого порта на маршруте сегодня на первое место выступает комфорт плавания и желание сойти на берег в центре города (гг. Стокгольм, Хельсинки, Таллин, Турку и др.).

Актуальным вопросом является ретроспективный анализ интенсивности паромного сообщения и представление всех направлений на Балтике, что также отражено в работах [11], [12]. Поэтому чем больше маршрутных линий включено в анализ, тем более полным будет анализ взаимного влияния паромных линий друг на друга и на рынок перевозок в целом и тем более точным будет прогноз. Классические модели прогнозирования в данном случае имеют ограничения для применения на макроуровне [13], [14]. При этом дополнительно открывается возможность составить прогноз наиболее востребованных участков Балтийского моря, где в ближайшее время будет наблюдаться рост.

Анализ и прогноз состояния паромных перевозок в Балтийском море. Для исследования рассмотрим интенсивность паромного сообщения 12–18 ноября 2018 г. Методологический базис сети паромных линий дан в работе [15]. В выборке присутствуют только регулярные паромные линии. Необходимо отметить, что выбранные паромные линии в основном выполняют постоянную работу на линии, несмотря на сезонность (сезонность приведет к еще большему увеличению интенсивности в уже имеющихся терминалах). Вопросы маршрутизации паромных и круизных линий рассмотрены также в работах [16], [17]. На основе выбранного интервала времени были составлены паромные направления между странами Балтийского моря, приведенные в табл. 2. Необходимо отметить, что в табл. 1 под в пассажирский терминал Санкт-Петербург включены маршруты Калининград – Усть-Луга.

Таблица 2

Интенсивность паромных судов в Балтийском море (12–18 ноября 2018 г.)

Пассажирские терминалы	Исходные данные							
	Хельсинки	Стокгольм	Санкт-Петербург	Таллинн	Осло	Киль	Аланды	Капельшер
Таллинн	15	3	0	0	0	0	0	0
Хельсинки	0	3	2	14	0	0	2	0

Таблица 2
(*Окончание*)

Стокгольм	3	0	0	2	0	0	2	0
Санкт-Петербург	2	0	0	1	0	1	0	0
Копенгаген	0	0	0	0	7	0	0	0
Клайпеда	0	0	1	0	0	**7**	0	0
Аланды	2	2	0	0	0	0	0	0
Турку	0	2	0	0	0	0	2	0
Мариехамн	0	0	0	7	0	0	0	3
Калининград	0	0	2	0	0	0	0	0
Пассажирские терминалы	Исходные данные							
	Засниц	Гедсер	Треллеборг	Хельсинки	Клайпеда	Нюнес-хамн	Санкт-Петербург	Хельсинки
Росток	7	7	7	0	0	0	0	0
Рига	0	7	0	0	0	0	0	0
Травемюнде	0	0	6	7	1	0	0	7
Гданьск	0	0	0	0	0	7	0	0
Гдыня	0	0	0	0	0	0	2	0
Любек	0	0	0	0	0	0	1	0

Для исследования исходных данных предлагается использовать круговые диаграммы связей, поскольку этот вид диаграмм является наиболее удобным инструментарием, основанным на определении логических взаимосвязей между различными данными имеющейся технической системы. В рассматриваемом случае появляется новая возможность проанализировать комплексно систему всех паромных перевозок в регионе и оценить взаимное влияние направлений друг на друга. Для удобства практической реализации исходные данные табл. 2 разбиваются на четыре равные части, по четыре пассажирских порта в каждой. На основе этих сегментов таблицы формируются матричные формы, которые представляют графически в виде диаграмм связей (рис. 2). В высоком разрешении этот рисунок доступен для скачивания по ссылке: https://journal.gumrf.ru/web/files/upload/art/10-6.pic2.rar). Далее на основе выбора регулярных паромных линий определяют количество паромных судов, указанное в табл. 3.

Таблица 3

Количество паромных судов в Балтийском регионе в сегменте крупных компаний

№ п/п.	Operator / Ferry	Количество паромных судов	№ п/п.	Operator / Ferry	Количество паромных судов
1	Stena Line	17	7	TT-Line	6
2	Tallink/Silja	11	8	Color Line	6
3	Finnlines	9	9	Unity Line	7
4	Viking Line	7	10	Fjord Line	4
5	DFDS Seaways	7	11	Eurotek	3
6	Scandlines	7	12	St. Peter Line	1

Полученные графические зависимости и анализ маршрутных сетей компаний (см. табл. 2 и 3) являются основанием для выделения областей Балтийского моря в которых будет увеличение интенсивностей паромных перевозок. При выполнения данного анализа использовались только

паромные перевозки. Если учитывать и круизные линии, то произойдет значительное увеличение судозаходов и интенсивностей движения, так как они будут находиться в направлении уже имеющихся центров притяжения на Балтике. Для того чтобы ответить на вопрос о том, на каких участках Балтийского моря будет наблюдаться увеличение интенсивностей движения пассажирских перевозок с учетом сезонности, необходимо выполнить следующие действия:

– теоретически разделить Балтийское море на четыре равные части;

– объединить данные из табл. 1–3 и построить графические зависимости круговых диаграмм связей (см. рис. 2) интенсивностей;

– выполнить усреднение и выделить области, характеризующиеся большими интенсивностями.

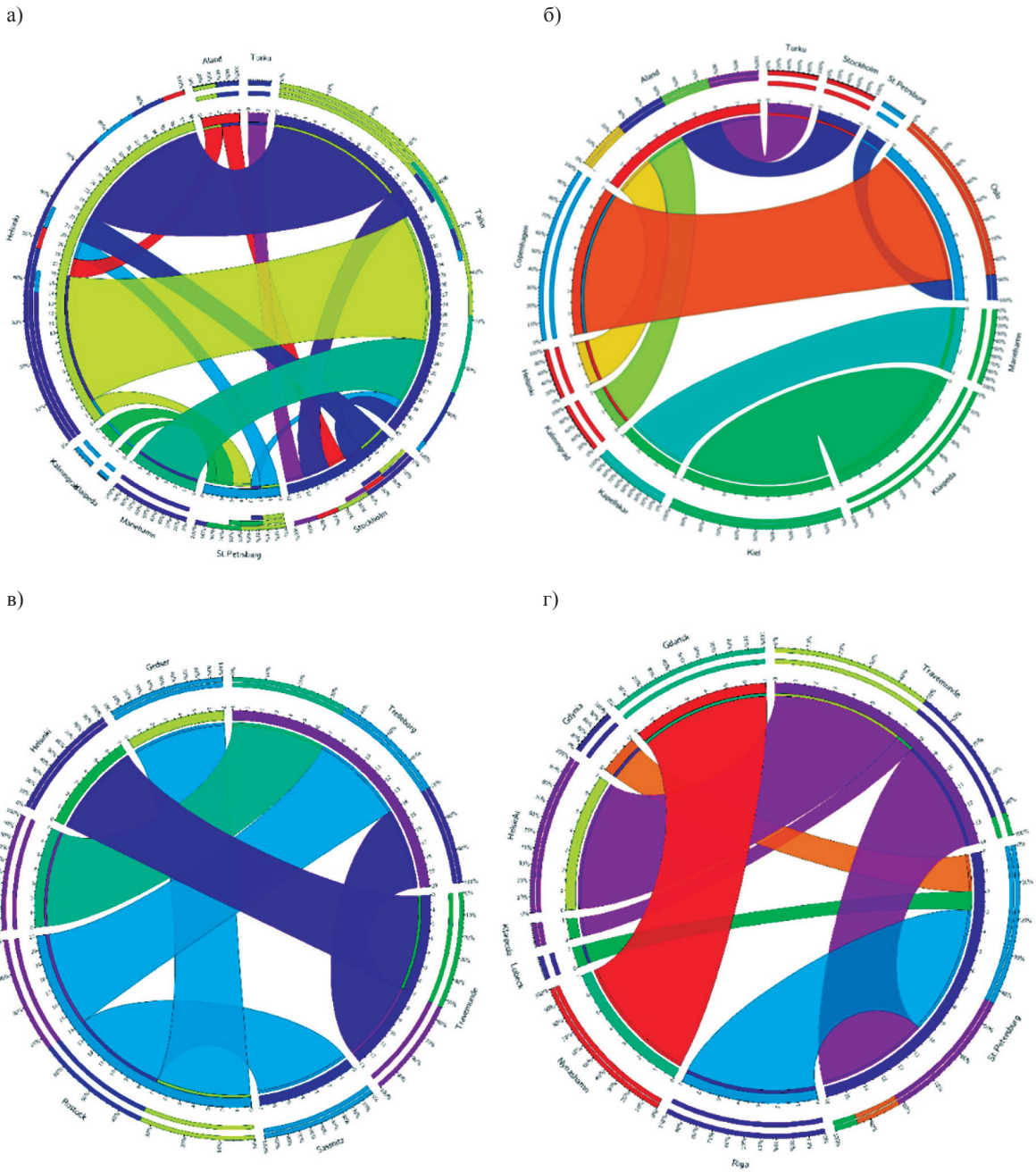


Рис. 2. Круговые диаграммы связей интенсивностей паромного движения в Балтийском море по маршрутам:
а — Хельсинки – Стокгольм – Санкт-Петербург – Таллинн;
б — Осло – Киль – Аланды – Капельшер; *в* — Засниц – Гедсер – Треллеборг – Хельсинки;
г — Клайпеда – Нюнесхамн – Санкт-Петербург – Хельсинки

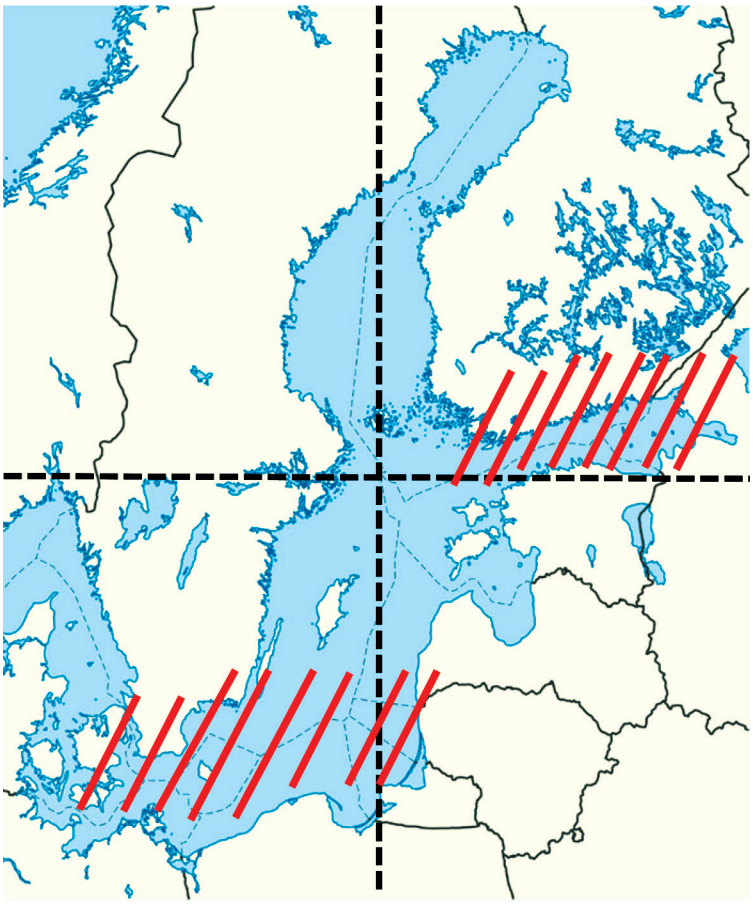


Рис. 3. Участки Балтийского моря, в которых прогнозируется повышенная интенсивность движения паромных судов по отношению к общей маршрутное паромной сети

Условные обозначения:

/ — области Балтийского моря, имеющие тенденцию к увеличению паромного и круизного движения

На основе проведенного исследования можно сделать вывод о том, что рост трафика паромных и круизных судов будет затрагивать главным образом порты, которые являются точками концентрации пассажиропотоков. Исключением является г. Санкт-Петербург, поскольку только после введения пассажирского порта Санкт-Петербург «Морской фасад» город стал являться «точкой роста» пассажиропотока на Балтике. Сегодня в Балтийском море порт «Морской фасад» является самым крупным терминалом. Согласно проведенному исследованию в работе [18], данная тенденция сохранится. На остальных участках Балтийского моря (рис. 3) интенсивность паромного сообщения меньше, несмотря на то, что терминалы Ботнического залива при улучшении инфраструктуры могут вступать в конкуренцию также за пассажиропоток.

Обсуждение (Discussion)

Особенностью исследования взаимодействия систем «морской пассажирский терминал / порт – паромная / круизная линия» является многокритериальность [19], [20], зависимость от условий, оказывающих влияние на пассажиропоток, и ценовая политика. Ввиду уникальности Балтийского региона в виде границы многих стран, необходимо учитывать их взаимное влияние, которое не может носить простой линейный характер зависимости некоторых двух переменных. Для каждой страны Балтийского моря можно сформировать свою уникальную целевую функцию, характерную для описания паромных перевозок. Класс задач полиномиальных моделей хорошо зарекомендовал себя при исследовании отдельных портов или, к примеру, при составлении

прогноза работы отдельной круизных линий. Представление исходных данный в виде набора таблиц и некоторой статистики не позволяет исследовать систему паромных пассажирских перевозок полностью в границах моря. Данное обстоятельство определяется различной статистикой по регионам, различным временным интервалам и различными количественными характеристиками. При работе с отдельными таблицами и дискретными данными можно качественно исследовать взаимное влияние, например, только двух регионов друг на друга. Однако современная тенденция заключается в сборе и анализе аналитических данных по всему региону, использовании моделей для макроуровня принятия решений, а также моделей системного уровня. При увеличении объектов исследования возрастает сложность, многокритериальность и, как следствие, будет возрастать вероятность ошибок и неправильного принятия решения. Можно использовать элементы теории принятия решений в условиях неопределенности [21]–[23], но в данном случае необходимо исследовать формирование набора гипотез и сравнить полученные результаты с достижением целевой функции или некоторого приближения к ней.

Исследование изменений и формирование прогнозов необходимо формировать только на основе системного подхода, а также анализа всех участков паромных линий. При этом необходимо более полно проводить ретроспективный анализ, так как зачастую причины ситуации, возникшей при паромных перевозках, являются следствием воздействий на систему в прошлом. Понимание этих механизмов позволит более полно проанализировать механизм изменения центров формирования пассажиропотоков и используемый при этом инструментарий. Только на этой основе можно предлагать новые оптимизационные модели.

Рассмотренные в статье задачи крайне актуальны, так как на базе имеющегося прогноза организации *CINN 2018 EUROPE* (*European Cruise Lines*) [18], [24], [25] на ее увеличение крайне актуальным является применение новых системных методов анализа всего рынка паромных перевозок (рис. 4).

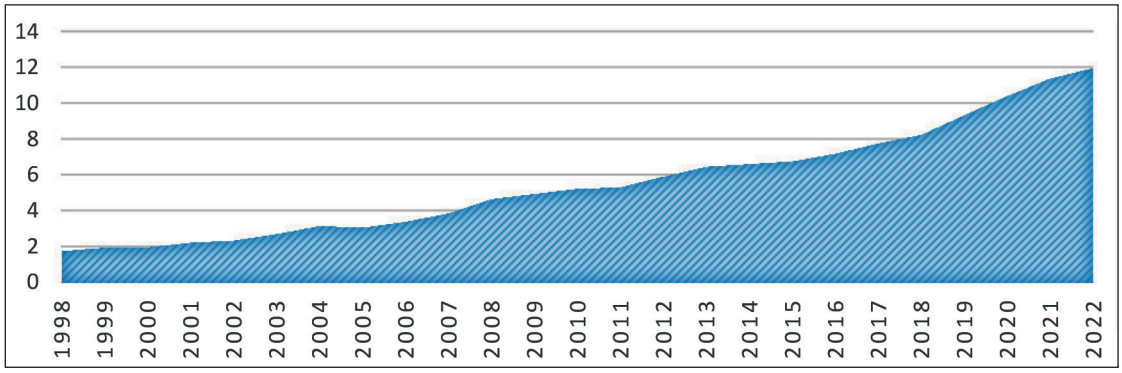


Рис. 4. Тенденция увеличения паромных и круизных линий до 2022 г.

В случае, если рассматривать задачу применительно к Балтийскому региону, то несмотря на сложившиеся центры притяжения пассажиропотоков, необходимо проанализировать вопросы взаимного влияния паромных линий и поиска участков Балтийского моря, где будет наблюдаться увеличение интенсивности паромного движения и пассажиропотоков.

Выводы (Summary)

На основе проведенного исследования можно сделать следующие выводы:

1. Обоснована необходимость проведения системного ретроспективного анализа для выявления причин, сформировавших наблюдающуюся ситуацию в паромных перевозках в Балтийском море применительно к Российским паромным линиям. Выполнен исторический анализ работы российских паромных судов на Балтике и выявлены основные переходные точки развития.

2. На основе данного анализа построены графические зависимости, отражающие изменения во взаимодействии систем паромная морская линия / морской пассажирский терминал. Данные

графики пропорционально отражают изменения в маршрутных сетях и демонстрируют как увеличение, так и уменьшение позиций на рынке перевозок в Балтийском море.

3. На основе проведенного анализа с учетом паромных линий других стран Балтийского региона сформулированы основные тенденции и представлена прогностическая информация по увеличению интенсивности движения до 2022 г.

4. Выполнен анализ маршрутной сети паромных линий и предложено использование круговых диаграмм связей, что является новым решением, так как позволяет исследовать не только интенсивности, но и определять взаимное влияние морских пассажирских терминалов друг на друга. Данные результаты на макроуровне невозможно получить, используя только табличные статистические данные.

5. Реализованы новые круговые диаграммы связей для Балтийского моря с учетом взаимодействия паромная морская линия / морской пассажирский терминал, открывающие новые возможности для прогнозирования направлений в которых будет рост пассажиропотока.

6. На основе анализа интенсивностей движения, работы основных исторически сложившихся терминалов, являющихся центрами притяжения пассажиропотоков, анализа и построения круговых диаграмм связей, отражающих взаимодействие между терминалами, определены области Балтийского моря, в которых прогнозируется увеличение интенсивности движения паромных судов, в том числе на основе сохраняемого тренда для увеличения круизной маршрутной сети.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Майоров Н. Н.* Прогнозирование процессов морского пассажирского терминала в классе полиномиальных моделей / Н. Н. Майоров // Вестник астраханского государственного технического университета. Серия: Морская техника и технология. — 2018. — № 3. — С. 113–122. DOI: 10.24143/2073-1574-2018-3-113-122.

2. *Паладич Л.* Грузопассажисркие суда / Л. Паладич // Морской флот. — 1990. — № 9. — С. 28–30.

3. *Калиниченко И.* Не нужен им берег российский // Коммерсантъ [Электронный ресурс] / И. Калиниченко. — Режим доступа: https://www.kommersant.ru/doc/883731 (дата обращения: 01.11.2018).

4. *Санжеева Д.* Как возрождалось и разрушалось Балтийское морское пароходство // Мойка 78 [Электронный ресурс] / Д. Санжеева. — Режим доступа: https://moika78.ru/news/2018-07-20/37364-kak-vozrozhdalos-i-razrushalos-baltiyskoey-morskoey-parokhodstvo (дата обращения: 01.11.2018).

5. M/S GEORG OTS [Электронный ресурс]. — Режим доступа: http://www.faktaomfartyg.se/georg_ots_1980.htm (дата обращения: 01.11.2018).

6. *Кичигин М.* «Таллинк» — только начало / М. Кичигин // Морской флот. — 1990. — № 7. — С. 2–3.

7. Карта паромной линии Усть-Луга – Балтийск – Засниц [Электронный ресурс]. — Режим доступа: http://www.eurotek.ru/node/216 (дата обращения: 01.11.2018).

8. Проект 161 (ГДР), тип «Композитор Кара-Караев» [Электронный ресурс]. — Режим доступа: http://fleetphoto.ru/projects/2000/ (дата обращения: 01.11.2018).

9. Бизнес-центр «Морской вокзал» [Электронный ресурс]. — Режим доступа: http://www.mvokzal.ru/morskoj-vokzal (дата обращения: 15.02.2018).

10. АО «Пассажирский Порт Санкт-Петербург «Морской фасад» [Электронный ресурс]. — Режим доступа: https://www.portspb.ru/ (дата обращения: 15.02.2018).

11. Baltic ports volumes in 2009// Baltic Transport Journal. — 2010. — № 4. — Pp. 28–33.

12. *Holma E.* Baltic Port Barometer 2012: Views of the Baltic ports for the year 2013 / E. Holma, S. Kajander. — Turku: University of Turku, 2012. — 24 p.

13. *Четыркин Е. М.* Статистические методы прогнозирования / Е. М. Четыркин. — 2-е изд., перераб. и доп. — М.: Статистика, 2007. — 199 с.

14. *Басовский Л. Е.* Прогнозирование и планирование в условиях рынка / Л. Е. Басовский. — М.: Финансы и статистика, 2002. — 345 с.

15. *Майоров Н. Н.* Методологический базис организации сети морских пассажирских перевозок / Н. Н. Майоров // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Морская техника и технология. — 2018. — № 2. — С. 28–37. DOI: 10.24143/2073-1574-2018-2-28-37.

16. *Mulder J.* Methods for strategic liner shipping network design / J. Mulder, R. Dekker // European Journal of Operational Research. — 2014. — Vol. 235. — Is. 2. — Pp. 367–377. DOI: 10.1016/ j.ejor.2013.09.041.

17. *Patric S.* Alternative solutions for terminal traffic / S. Patric, N. Marcus. — Göteborg, Sweden, 2006. — 83 p.

18. CINN 2018 EUROPE. European Cruise Lines [Электронный ресурс]. — Режим доступа: https://www.cruiseindustrynews.com/pdf/ (дата обращения: 01.11.2018).

19. *Майоров Н. Н.* Морские пассажирские терминалы: современные тенденции развития / Н.Н. Майоров, В. А. Фетисов // Логистика: современные тенденции развития: материалы XVII Международной научно-практической конференции. — СПб.: Изд-во ГУМРФ им. адм. С. О. Макарова, 2018. — С. 312–315.

20. *Krile S.* Forecasting the operational activities of the sea passenger terminal using intelligent technologies / S. Krile, N. Maiorov, V. Fetisov // Transport Problems: an International Scientific Journal. — 2018. — Vol. 13. — Is. 1. — Pp. 27–36.

21. *Maiorov N. N.* Conditions for choosing a mathematical model for simulation of passenger processes / N. N. Maiorov // Bulletin of the Unesco department «Distance education in engineering». — 2017. — Is. 2. — Pp. 16–19.

22. *Maiorov N. N.* The system approach to the simulation of transport systems / N. N. Maiorov, V. A. Fetisov. — SPb.: SUAI, 2013. — 71 p.

23. *Бродецкий Г. Л.* Системный анализ в логистике. Принятие решений в условиях неопределенности / Л. Г. Бродецкий. — М.: ACADEMA, 2010. — 336 с.

24. *Barron P.* Issues determining the development of cruise itineraries: A focus on the luxury market / P. Barron, A. B. Greenwood //Tourism in Marine Environments. — 2006. — Vol. 3. — Is. 2. — Pp. 89–99. DOI: 10.3727/154427306779435238.

25. *Lekakou M. B.* Which homeport in Europe: The cruise industry's selection criteria / M. B. Lekakou, A. A. Pallis, G. K. Vaggelas // Tourismos: An international multidisciplinary journal of tourism. — 2009. — Vol. 4. — Is. 4. — Pp. 215–240.

REFERENCES

1. Maiorov, Nikolaj Nikolaevich. "Forecasting processes of maritime passenger terminal in the class of polynomial models." *Vestnik of Astrakhan State Technical University. Series: Marine Engineering and Technologies* 3 (2018):113–122. DOI: 10.24143/2073-1574-2018-3-113-122.

2. Paladich, L. "Gruzopassazhisrkie suda." *Morskoi flot* 9 (1990): 28–30.

3. Kalinichenko, I. "Ne nuzhen im bereg rossiiskii." *Kommersant"*. Web. 1 Nov. 2018 <https://www.kommersant.ru/doc/883731>.

4. Sanzheeva, D. "Kak vozrozhdalos' i razrushalos' Baltiiskoe morskoe parokhodstvo." *Moika 78*. Web. 1 Nov. 2018 <https://moika78.ru/news/2018-07-20/37364-kak-vozrozhdalos-i-razrushalos-baltiyskoey-morskoey-parokhodstvo>.

5. M/S GEORG OTS. Web. 1 Nov. 2018 <http://www.faktaomfartyg.se/georg_ots_1980.htm>.

6. Kichigin, M. "Tallink"- tol'ko nachalo." *Morskoi flot* 7 (1990): 2–3.

7. Karta paromnoi linii Ust'-Luga - Baltiisk – Zasnits. Web. 1 Nov. 2018 <http://www.eurotek.ru/node/216>.

8. Proekt 161 (GDR), tip Kompozitor Kara Karaev. Web. 1 Nov. 2018 <http://fleetphoto.ru/projects/2000/>.

9. Biznes-tsentr «Morskoi vokzal». Web. 15 Feb. 2018 <http://www.mvokzal.ru/morskoj-vokzal>.

10. AO «Passazhirskii Port Sankt-Peterburg «Morskoi fasad». Web. 15 Feb. 2018 <https://www.portspb.ru/>.

11. "Baltic ports volumes in 2009." *Baltic Transport Journal* 4 (2010): 28–33.

12. Holma, Elisa, and Sakari Kajander. *Baltic Port Barometer 2012: Views of the Baltic ports for the year 2013*. Turku: University of Turku, 2012.

13. Chetyrkin, E. M. *Statisticheskie metody prognozirovaniya*. 2d edition. M.: Statistika, 2007.

14. Basovskii, L. E. *Prognozirovanie i planirovanie v usloviyakh rynka*. M.: Finansy i statistika, 2002.

15. Maiorov, Nikolaj Nikolaevich. "Methodological principles of the organization of the marine passenger transport network." *Vestnik of Astrakhan State Technical University. Series: Marine Engineering and Technologies* 2 (2018): 28–37. DOI: 10.24143/2073-1574-2018-2-28-37.

16. Mulder, Judith, and Rommert Dekker. "Methods for strategic liner shipping network design." *European Journal of Operational Research* 235.2 (2014): 367–377. DOI: 10.1016/j.ejor.2013.09.041.

17. Patric, S., and N. Marcus. *Alternative solutions for terminal traffic*. Göteborg, Sweden, 2006.

18. CINN 2018 EUROPE. European Cruise Lines. Web. 1 Nov. 2018 <https://www.cruiseindustrynews.com/pdf/>.

19. Maiorov, N. N., and V. A. Fetisov. "Morskie passazhirskie terminaly: sovremennye tendentsii razvitiya." *Logistika: sovremennye tendentsii razvitiya: materialy XVII Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii.* SPb.: Izd-vo GUMRF im. adm. S. O. Makarova, 2018. 312–315.

20. Krile, Srećko, Nikolai Maiorov, and Vladimir Fetisov. "Forecasting the operational activities of the sea passenger terminal using intelligent technologies." *Transport Problems: an International Scientific Journal* 13.1 (2018): 27–36.

21. Maiorov, N. N. "Conditions for choosing a mathematical model for simulation of passenger processes." *Bulletin of the Unesco department «Distance education in engineering»* 2 (2017): 16–19.

22. Maiorov, N. N., and V. A. Fetisov. *The system approach to the simulation of transport systems.* SPb.: SUAI, 2013.

23. Brodetskii, G. L. *Sistemnyi analiz v logistike. Prinyatie reshenii v usloviyakh neopre-delennosti*. M.: ACADEMA, 2010.

24. Barron, Paul, and Ana Bartolome Greenwood. "Issues determining the development of cruise itineraries: A focus on the luxury market." *Tourism in Marine Environments* 3.2 (2006): 89–99. DOI: 10.3727/154427306779435238.

25. Lekakou, María B., Athanasios A. Pallis, and George K. Vaggelas. "Which homeport in Europe: The cruise industry's selection criteria." *Tourismos: An international multidisciplinary journal of tourism* 4.4 (2009): 215–240.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

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

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

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

Статья поступила в редакцию 10 декабря 2018 г.
Received: December 10, 2018.

Научное периодическое издание

Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова

Том 10. № 6

2018 год

Выпускающий редактор *Н. А. Карамзина*
Редактор *Т. В. Середова*
Дизайн и верстка *М. Н. Евсюткина*

Подписано в печать с оригинал-макета 22.12.18. Формат 60×90/8
Гарнитура Times New Roman. Усл. печ. л. 26. Тираж 500 экз. Заказ № 617/18

Государственный университет морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова
198035, Санкт-Петербург, ул. Двинская, 5/7