

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. № 5

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

САНКТ-ПЕТЕРБУРГ
2018

Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — СПб.: ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова, 2018. — Т. 10. — № 5. — 216 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.



28.11.1943–24.10.2018

Макаров Геннадий Васильевич

**доктор технических наук, профессор,
действительный член Российской академии транспорта,
Заслуженный работник высшей школы РФ,
Почётный полярник,
Почётный работник ГМА,
Почётный работник гидрометеослужбы России**

После окончания Ленинградского высшего инженерного морского училища им. адм. С. О. Макарова (ЛВИМУ) в 1967 г. вся жизнь Геннадия Васильевича Макарова была связана с подготовкой специалистов для Северного морского пути. Он прошел путь от ассистента до профессора. Более тридцати лет возглавлял кафедру геодезии Арктического факультета. Являлся автором многочисленных научных работ и учебной литературы для курсантов. До 2013 г. был научным редактором сборника научных статей «Эксплуатация морского транспорта», а с 2014 г. входил в состав редакционной коллегии научного журнала «Вестник государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова». До последних дней вел активную работу в составе диссертационного совета университета, являлся научным руководителем аспирантов.

Геннадий Васильевич был добрым, отзывчивым и глубоко порядочным человеком, старавшимся привить молодым курсантам любовь и добросовестное отношение к делу, которому он посвятил всю свою жизнь. Его забота и участие помогли многим курсантам преодолеть трудности первых лет обучения и оказали поддержку в постижении особенностей выбранной специальности.

Деканат Арктического факультета занимается сбором материалов о жизни Геннадия Васильевича Макарова для издания книги о нем. Телефон для справок: 421-48-53.



СОДЕРЖАНИЕ

ЭКСПЛУАТАЦИЯ ВОДНОГО ТРАНСПОРТА, СУДОВОЖДЕНИЕ 897

Ершов А. А., Михневич А. В. Использование характеристик маневрирования для обеспечения безопасности движения судов в узкостях 897

Ермаков С. В. Особенности зрительного восприятия навигационной информации в бухтах с холмистым рельефом побережья и их влияние на безопасность плавания 911

Фадюшин С. Г. Человеческий фактор судовождения в аспекте кибернетического подхода 922

ВОДНЫЕ ПУТИ СООБЩЕНИЯ И ГИДРОГРАФИЯ 936

Ильинский Д. А., Рогинский К. А., Ганжа О. Ю. Геофизические технологии для изучения процессов образования глубинной нефти 936

Андреева Е. В., Афонин А. Б., Тезиков А. Л. Обоснование выбора количественных показателей зон маневрирования в акватории Северного морского пути 951

Султанов Т. Т., Тлепиева Г. М. Напряженно-деформированное состояние морских буровых платформ на шельфе Каспийского моря 960

Ольховик Е. О. Исследование плотности транспортных потоков 2018 года в акватории Северного морского пути 975

СУДОСТРОЕНИЕ И СУДОРЕМОНТ 983

Халявкин А. А., Ауслендер А. Я. Оценка влияния упругих свойств кормового дейдвудного подшипника на значение собственной частоты при линейных поперечных колебаниях судового валопровода 983

Русановский С. А., Худяков М. П., Черенков Н. И. Моделирование формообразования кромок отверстий в корпусах объектов подводного кораблестроения 993

Цветков Ю. Н., Горбаченко Е. О. Особенности изменения профиля поверхности алюминиевых бронз при кавитационном изнашивании в морской воде 1004

СУДОВЫЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ УСТАНОВКИ, СИСТЕМЫ И УСТРОЙСТВА 1015

Леонов В. Е., Сердюк А. Д. Каталитическая очистка отработанных газов в судовых энергетических установках 1015

Королёв В. И. Теплорасходная диаграмма пара и конденсата для анализа режимов использования теплофикационных паротурбинных установок 1025

Том 10. № 5

2018

РЕДАКЦИОННЫЙ СОВЕТ

Гл. редактор

С. О. Барышников,

д.т.н., проф.

rector@gumrf.ru

Зам. гл. редактора

А. П. Нырклов,

д.т.н., проф.

NyrklovAP@gumrf.ru

С. Гуцма —

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

Г. В. Егоров —

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

Ф. В. Кармазинов —

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

Р. Качиньски —

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

А. И. Пошивай —

заместитель руководителя Федерального агентства морского и речного транспорта

А. Е. Сазонов —

д.т.н., проф., чл.-кор. РАН

Р. М. Юсупов —

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

РЕДАКЦИЯ:

E-mail: journal@gumrf.ru

http://journal.gumrf.ru

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

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

Подписной индекс в каталоге Роспечать — 37276.

Все материалы, поступившие в редакцию, рецензируются.

**Члены
редколлегии:**

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

<i>Жуков В. А., Мельник О. В., Тузов Л. В.</i> Влияние износа деталей цилиндрической поршневой группы дизеля на температурное состояние поршня	1040
<i>Сорокин И. В.</i> Исследование электроэнергетических систем подводной компрессорной станции	1053
<i>Шаратов А. С.</i> Снижение влияния условий эксплуатации на тепломеханическую нагруженность двигателя путем струйного воздействия воды на винт.....	1063
ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ КОМПЛЕКСЫ И СИСТЕМЫ	1075
<i>Рулевский В. М., Юдинцев А. Г., Чех В. А.</i> Управление трехфазным автономным инвертором напряжения с предмодуляцией третьей гармоники в системе электропитания глубоководного аппарата	1075
<i>Горбцов А. П., Маринич А. Н., Устинов Ю. М.</i> Сопоставление судовых радаров, работающих в S-, X-, K _a -диапазонах	1087
ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И АВТОМАТИЗАЦИЯ НА ТРАНСПОРТЕ	1094
<i>Кузнецов А. Л., Семенов А. Д., Щербакова-Слюсаренко В. Н.</i> Теоретико-множественная модель для расчета операционных ресурсов контейнерного терминала.....	1094

CONTENST

OPERATION OF WATER TRANSPORT, NAVIGATION	897
<i>Ershov A. A., Mikhnevich A. V.</i> The use of characteristics of maneuvering to ensure the safety of vessel traffic in the narrows	897
<i>Ermakov S. V.</i> Features of visual perception of navigation information in bays with hilly relief of the coast and their influence on the safety of navigation	911
<i>Fadyushin S. G.</i> Human factor of navigation in the aspect of cybernetic approach	922
WATERWAYS AND HYDROGRAPHY	936
<i>Ilinskiy D. A., Roginskiy K. A., Ganzha O. Y.</i> Geophysical technologies for study of deep oil genesis	936
<i>Andreeva E. V., Afonin A. B., Tezikov A. L.</i> The rationale for the selection of quantitative indicators zones of maneuvering in the water area of the Northern sea route	951
<i>Sultanov T. T., Tlepiyeva G. M.</i> Stress-deformed condition of the marine drilling platform on the shelf of the Caspian Sea	960
<i>Ol'khovik E. O.</i> Research of the density of transports flows on the Northern Sea Route in 2018 year	975
SHIPBUILDING AND SHIP REPAIR	983
<i>Halyavkin A. A., Auslender A. Ya.</i> Assessment of influence of elastic properties of the fodder deadwood bearing on value of own frequency at linear cross fluctuations of the ship shaft line	983
<i>Rusanovskiy S. A., Khudyakov M. P., Cherenkov N. I.</i> Modeling of edges of openings in cases of objects of underwater shipbuilding	993
<i>Tsvetkov Yu. N., Gorbachenko Ye. O.</i> Peculiarities of a change in the surface profile of aluminum bronzes in cavitation wear in sea water	1004
SHIP POWER PLANTS, SYSTEMS AND DEVICES	1015
<i>Leonov V. Ye., Serdyuk A. D.</i> The catalytic neutralization of exhaust gases in ship power plants	1015
<i>Korolev V. I.</i> Heat flow rate chart for steam and condensate analyze co-generation steam turbine plants use regimes floating objects with nuclear power plant	1025
<i>Zhukov V. A., Melnik O. V., Tuzov L. V.</i> The influence of the wear of diesel's cylinder group on the temperature state of piston	1040
<i>Sorokin I. V.</i> Research electrical power systems of underwater compressor station	1053
<i>Sharatov A. S.</i> Reducing the influence of operating conditions on thermomechanical loading of the engine by the jet of water on the screw	1063

Volume 10. № 5

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.
NyrkovAP@gumrf.ru

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

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

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

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

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

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

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

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

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

ELECTRICAL EQUIPMENT AND SYSTEMS..... 1075

Rulevskiy V. M., Yuditsev A. G., Chekh V. A. The control of three-phase voltage source inverter with the third harmonic premodulation in the power supply of deep-water vehicle 1075

Gorobtsov A. P., Marinich A. N., Ustinov Y. M. Comparative analysis of S, X, K_a frequency ship's radars 1087

INFORMATION TECHNOLOGY AND AUTOMATION IN TRANSPORT..... 1094

Kuznetsov A. L., Semenov A. D., Shcherbakova-Slyusarenko V. N. Set theory model for the assessment of the container terminal's operational resources 1094

ЭКСПЛУАТАЦИЯ ВОДНОГО ТРАНСПОРТА, СУДОВОЖДЕНИЕ

DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-5-897-910

THE USE OF CHARACTERISTICS OF MANEUVERING TO ENSURE THE SAFETY OF VESSEL TRAFFIC IN THE NARROWS

A. A. Ershov, A. V. Mikhnevich

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

This article proposes a method of taking into account the parameters of maneuvering the vessel in solving problems of ensuring the safety of ships in the narrowness. This method can be used in the development of ship navigation equipment, including those designed to control traffic safety and solve problems of divergence of ships (radar, ARPA etc.), including for ships operated without human intervention. In General, the concept of "safe maneuvering zone" (SMZ) of a vessel may be defined as a part of the water area within which the vessel can avoid immediate danger only by its maneuver. Another the concept of "area of safe movement" (ASM) of the vessel can be defined as the area within which the ship can carry out safe movement, keeping your course and speed. In this paper, we propose the use of zones of vessel movement, as well as safe maneuvering zones to solve the problems of ship safety in narrow waters, as well as problems on the differences of ships. The proposed method of using the ASM and SZM allows taking into account not only the current movement of the vessel, but also its possible maneuvering. for a certain period of time, which can be chosen equal to the interval of the ship's motion vector, is used in modern ARPA and radar to predict the movement and solve problems of traffic. The addition of the motion vector of the vessel with the parameters of the ASM and SZM can be used for a more accurate risk assessment of the movement of the vessel in the conditions of narrowness and the danger of collisions and used for development of navigation equipment and use modern navais (ARPA, radar etc). The article suggests ways to determine the parameters of the ASM and SZM for a certain period of time, and it is proposed to use the parameters of the extreme maneuvering zone included in the information on the maneuvering characteristics of each vessel (the table of maneuvering elements) in accordance with the requirements of IMO Resolution A. 601(15) at the first stage of implementation. With the accumulation of information on other vessels, specific LMS and LSA of each vessel can be calculated for use in advanced navigation AIDS (ARPA, radar etc.) in assessing the safety of vessel traffic in narrow areas and in solving problems of vessel divergence. The proposed method of using the maneuvering characteristics of the vessel to assess the safety of ships in the narrowness can be used, including for promising "unmanned" vessels operated without human intervention

Keywords: accounting for the manoeuvring of the vessel, the development of navigation technology, ensuring the safety of ships in the narrows

For citation:

Ershov, Andrey A., and Andrey V. Mikhnevich. "The use of characteristics of maneuvering to ensure the safety of vessel traffic in the narrows." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova* 10.5 (2018): 897–910. DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-5-897-910.

УДК 655.62.052.4

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК МАНЕВРИРОВАНИЯ ДЛЯ ОБЕСПЕЧЕНИЯ БЕЗОПАСНОСТИ ДВИЖЕНИЯ СУДОВ В УЗКОСТЯХ

А. А. Ершов, А. В. Михневич

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

В настоящей статье предлагается способ учета параметров маневрирования судна при решении задач обеспечения безопасности судов в узкостях. Этот способ может быть использован в развитии судовой

навигационной техники, в том числе предназначенной для контроля безопасности движения и решения задач расхождения судов (БРЛС, САРП, РЛС и др.), в частности для судов, управляемых без участия человека. В общем случае предлагаемое понятие «зона безопасного маневрирования» (ЗБМ) судна может определяться как часть акватории, внутри которой судно может избежать непосредственной опасности только своим маневром. Другое понятие «зона безопасного движения» (ЗБД) судна может быть определено как зона, в пределах которой судно может осуществлять безопасное движение, сохраняя свои курс и скорость. В настоящей статье предлагается использование зон движения судна и зон безопасного маневрирования для решения проблем обеспечения безопасности движения судов в узкостях и задач о расхождении судов. Предлагаемый способ использования ЗБМ и ЗБД судна позволяет учитывать не только текущее движение судна, но и его возможное маневрирование в течение определенного промежутка времени, который можно принять равным промежутку вектора движения судна, используемого в современных САРП и РЛС для прогнозирования движения судна и решения задач расхождения. Дополнение этого вектора движения судна параметрами ЗБД и ЗБМ может быть использовано для более точной оценки опасности движения судна в узкости и опасности столкновения, а также для развития навигационной техники и использования в перспективных навигационных средствах (САРП, РЛС, БРЛС). В статье предложены способы определения параметров ЗБД и ЗБМ в течение определенного промежутка времени, а также рекомендовано на первом этапе внедрения использовать параметры зоны экстремального маневрирования, входящего в информацию о маневренных характеристиках каждого судна (Таблицу маневренных элементов), далее в тексте — Таблица маневренных характеристик в соответствии с требованиями Резолюции ИМО А.601(15). По мере накопления информации о других судах могут рассчитываться конкретные ЗБМ и ЗБД каждого судна для использования в перспективных навигационных средствах (САРП, РЛС, БРЛС и др.) при оценке безопасности движения судов в узкостях и при решении задач расхождения судов. Предлагаемый способ использования маневренных характеристик судна для оценки безопасности движения судов в узкостях может быть использован, в том числе для перспективных «беспилотных» судов, управляемых без участия человека.

Ключевые слова: учет маневрирования судна, развитие навигационной техники, обеспечение безопасности судов в узкостях.

Для цитирования:

Ершов А. А. Использование характеристик маневрирования для обеспечения безопасности движения судов в узкостях / А. А. Ершов, А. В. Михневич // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2018. — Т. 10. — № 5. — С. 897–910. DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-5-897-910.

Введение (Introduction)

Совершенствование судовой и береговой навигационной техники, а также планируемое появление судов, управляемых без участия человека, приводит к появлению проблем, связанных с обеспечением безопасности движения судов в узкостях и ограниченных районах плавания. Проблема повышения безопасности судов в узкостях посвящены работы [1] – [5], существенным недостатком которых является то, что они не учитывают параметры возможного маневрирования судов при оценке безопасности движения и решении задач расхождения в узкостях. Например, в работах [6], [7] предлагалось использование специальных зон маневрирования судов как способа решения задач безопасности. В работах [8] – [12] рассматривались маневры во избежание возникновения опасных ситуаций при различных условиях плавания. Предлагается использование нейронных сетей в решении задач мореплавания [13] – [16].

В настоящей статье предлагается способ учета параметров маневрирования судна при решении задач обеспечения безопасности судов в узкостях, который может быть использован в развитии или предложен в процессе усовершенствования судовой навигационной техники, в том числе предназначенной для контроля безопасности движения и решения задач расхождения судов (БРЛС, САРП, РЛС и др.). Предлагаемый способ может быть рекомендован для судов, управляемых без участия человека.

Методы и материалы (Methods and Materials)

Для обеспечения собственного движения с заданными курсом и скоростью, а также для выполнения других маневров судно занимает определенную часть акватории, на которой осуществляет движение или маневрирование. Размер этой части акватории, отсутствие внутри

опасностей в виде мелей, других судов или морских сооружений определяет возможность судна осуществить безопасное маневрирование или расхождение с другими судами при помощи только своих маневров.

В соответствии с Резолюцией ИМО А.601(15), в состав информации о маневренных характеристиках судна (Таблица маневренных характеристик) включена зона экстремального маневрирования (рис. 1), которая позволяет выполнить сравнение характеристик реверса судна на «полный задний ход» с выполнением циркуляций на правый или левый борт с максимальными углами перекадки руля. Эти маневры судна являются экстремальными, они выполняются во избежание судном непосредственной опасности, которая может возникнуть в процессе его движения или расхождения с другими судами. Таким образом, информация, которая требуется в соответствии с Резолюцией ИМО А.601(15), может быть определена как *зона экстремального маневрирования судна* (ЗЭМ). В общем случае может быть предложено понятие «зона безопасного маневрирования» (ЗБМ) судна, определяемая как часть акватории, внутри которой судно может избежать непосредственной опасности только своим маневром. Другое понятие «зона безопасного движения» (ЗБД) судна может быть определено как зона, в пределах которой судно может осуществлять безопасное движение, сохраняя свои курс и скорость.

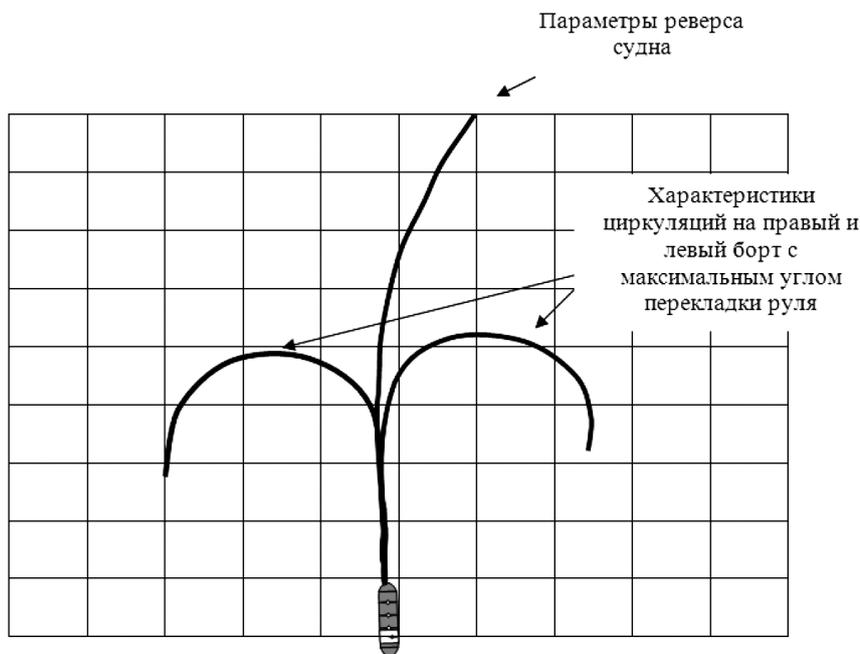


Рис. 1. Параметры зоны экстремального маневрирования

Параметры зон, в которых судно может осуществлять свое безопасное движение (параметры ЗБД) и / или избегать непосредственной опасности только своим маневром (параметры ЗБМ), применяя для этого в случае необходимости свои экстремальные возможности, а именно: реверсирование, уход на циркуляцию с наибольшим углом перекадки руля и другие, зависят от размеров судна, его маневренных характеристик, состояния моря, наличия ветра, течения, оборудования судна винтами регулируемого (ВРШ) или винтами фиксированного шага (ВФШ), загрузки судна, наличия и размеров его палубного груза, скорости движения, осадки носом и кормой и многих других факторов.

Размеры акватории с достаточными глубинами, обеспечивающими безопасность судна в различных ситуациях, которые должны предоставлять судну возможность движения с постоянным курсом и скоростью, позволять маневрировать в случае возникновения опасности, а при необходимости создавать условия для выполнения экстремального маневрирования во избежание непосредственной опасности, определяются параметрами ЗБД и ЗБМ конкретного судна.

Если размеры акватории, на которой судно осуществляет свое движение, не позволяют ему выполнить эти маневры, т. е. не соответствуют ЗБД и ЗБМ судна, то судно не может обеспечивать свою безопасность во всех случаях и всегда избегать опасности только собственным маневрированием, что характерно для перспективных навигационных средств обеспечения безопасности движения судов в узкостях. Таким образом, размеры акватории, на которой может быть обеспечено безопасное движение одного судна, должны быть такими, чтобы давать возможность судну осуществлять движение с постоянным курсом и скоростью, выполнять маневренные операции, осуществлять экстремальное маневрирование в случае возникновения опасности, т. е. они должны быть непосредственно связаны с параметрами движения судна ЗБД и ЗБМ судна, а также определяться точностью обсерваций.

При движении судна с постоянным курсом и скоростью ЗБД судна может определяться шириной акватории, занимаемой судном при своем движении. Ширина акватории, которую занимает судно при своем движении постоянным курсом и скоростью, приближенно может быть определена следующим образом (рис. 2):

$$\text{Ш} = L \sin \beta + B \cos \beta, \quad (1)$$

где Ш — ширина, акватории, которую занимает судно при своем движении, м; L — длина судна, м; B — ширина судна, м; β — угол дрейфа судна, град.

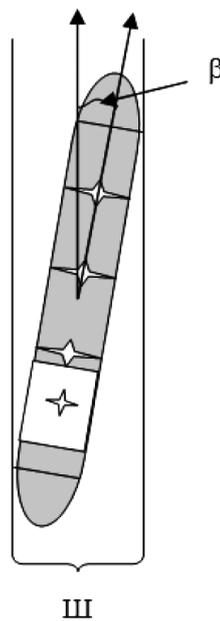


Рис. 2. Ширина полосы движения судна, двигающегося с постоянными курсом и скоростью

При движении судна в пределах определенной акватории его место в общем случае известно с ошибкой, которая при наличии случайных погрешностей может оцениваться либо элементами эллипса погрешностей, либо радиальной ошибкой обсервованного места судна (максимальной погрешностью обсервации (M)).

В случае, если выполняется учет ошибок навигационных измерений и эти ошибки неизменны во времени, полная (максимальная) ширина полосы безопасного движения судна может быть определена (рис. 3) в виде

$$\text{Ш} = L \sin \beta + B \cos \beta + 2M, \quad (2)$$

где M — радиальная ошибка обсервованного места судна, или максимальная погрешность обсервации, м.

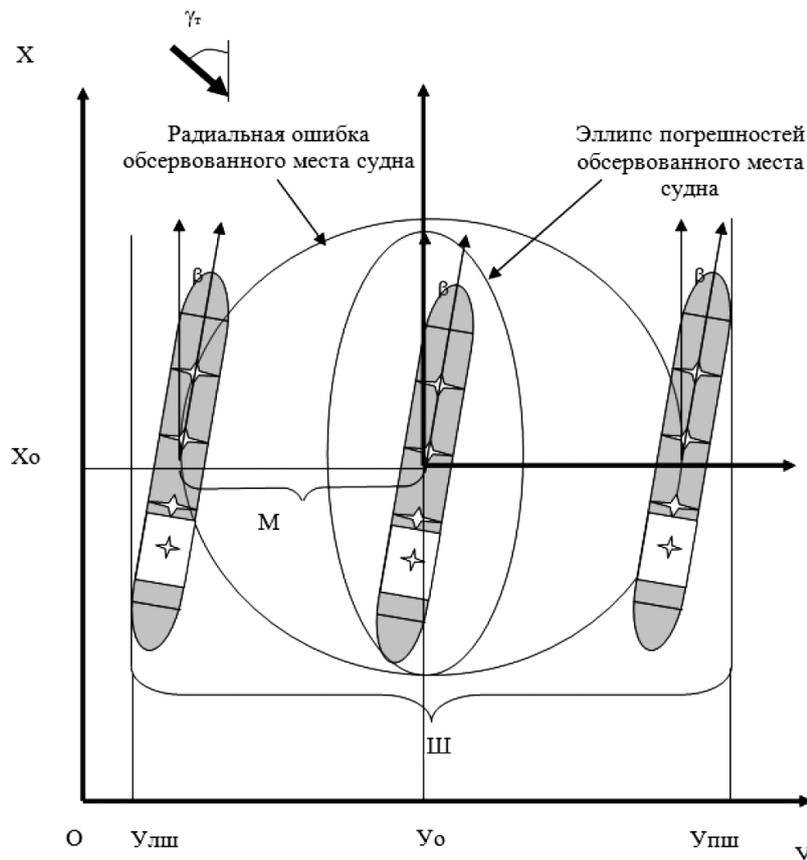


Рис. 3. Ширина полосы движения судна с учетом ошибок навигационных измерений

При наличии постоянного течения необходимо учесть изменение ширины полосы движения судна за счет сноса:

$$\Delta \text{III} = \int_0^t v_t \sin \gamma_t dt, \quad (3)$$

где γ_t — направление течения, град.; v_t — скорость течения, м/с.

При определении границ ширины полосы безопасного движения судна относительно неподвижной системы координат XOY (см. рис. 3) координата правого края ширины (полосы) движения судна ($Y_{\text{пш}}$) может определяться в виде

$$Y_{\text{пш}} = Y_0 + M + \frac{L}{2} \sin \beta + \frac{B}{2} \cos \beta + \int_0^t v_t \sin \gamma_t dt, \quad (4)$$

координата левого края ширины (полосы) движения судна ($Y_{\text{лш}}$) — в виде

$$Y_{\text{лш}} = Y_0 - M - \frac{L}{2} \sin \beta - \frac{B}{2} \cos \beta + \int_0^t v_t \sin \gamma_t dt, \quad (5)$$

где $Y_{\text{лш}}$ — левая координата ширины (полосы) движения судна при постоянных курсе и скорости, м; $Y_{\text{пш}}$ — правая координата ширины (полосы) движения судна при постоянных курсе и скорости, м; t — время движения судна данными курсом и скоростью, с.

При выполнении маневра на циркуляцию с максимальным углом перекладки на правый борт длина и ширина ЗБМ судна могут быть определены следующим образом (рис. 4). Ширина ЗБМ ($\text{Ш}_{\text{ЗБМп}}$) при выполнении циркуляции на правый борт с учетом радиальной ошибки определения места судна M ориентировочно может быть определена в виде, показанном на рис. 4, а:

$$\text{Ш}_{\text{ЗБМп}} = \frac{L}{2} \sin \beta + \frac{B}{2} \cos \beta + M + D_{\text{ПЦ}} \quad (6)$$

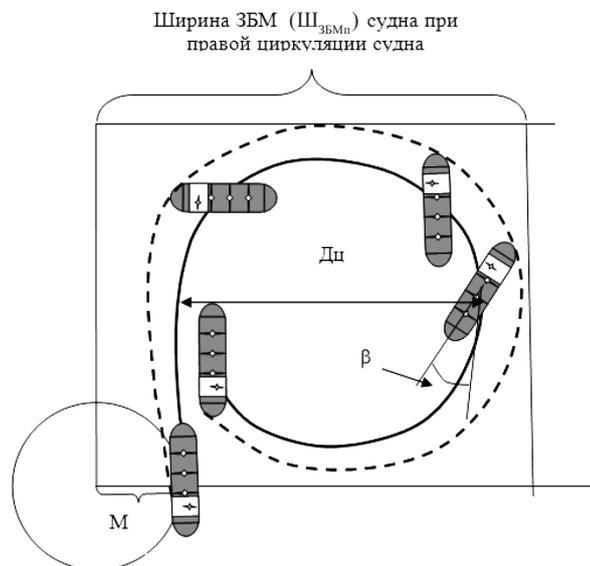
где β — угол дрейфа судна при движении на циркуляции при максимальном диаметре в направлении, поперечном курсу судна, град.; $D_{\text{ПЦ}}$ — максимальный диаметр циркуляции при максимальном угле перекладки руля на правый борт (правой циркуляции судна), м.

Длина ЗБМ судна при выполнении правой циркуляции $D_{\text{ЗБМп}}$, м, с учетом радиальной ошибки определения места судна M ориентировочно может быть определена в виде, приведенном на рис. 4, б:

$$D_{\text{ЗБМп}} = L \sin \beta + B \cos \beta + M + B_{\text{ПЦ}} \quad (7)$$

где $B_{\text{ПЦ}}$ — выдвиг судна при выполнении правой циркуляции, т. е. расстояние, проходимое средней точкой судна в направлении первоначального курса от позиции, в которой была отдана команда на руль, до позиции, когда курс изменится на 90° от своего первоначального значения, м; β — угол дрейфа судна при движении на циркуляции при максимальном диаметре в направлении по курсу судна, град.

а)



б)

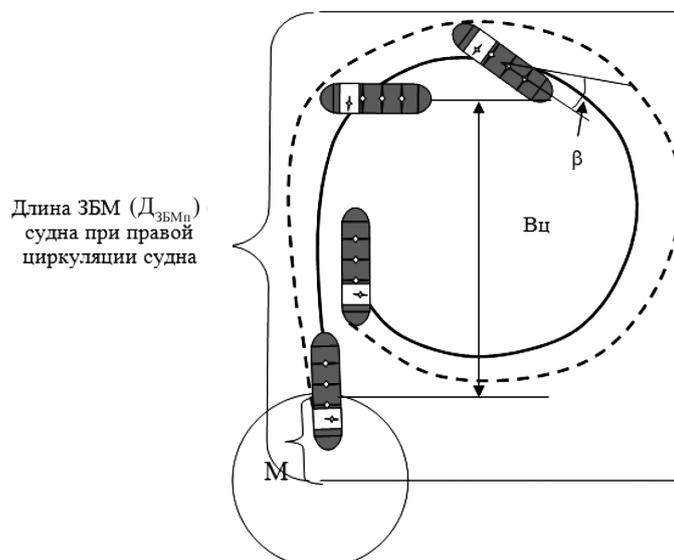


Рис. 4. Определение ширины (а) и длины (б) зоны безопасного маневрирования судна при выполнении циркуляции на правый борт с максимальным углом перекладки руля

При выполнении маневра ухода судна на левую циркуляцию формулы для определения ширины ($\text{Ш}_{\text{ЗБМл}}$) и длины ($\text{Д}_{\text{ЗБМл}}$) ЗБМ могут быть определены в виде

$$\text{Ш}_{\text{ЗБМл}} = \frac{L}{2} \sin \theta + \frac{B}{2} \cos \theta + M + D_{\text{ЛЦ}}, \quad (8)$$

где $D_{\text{ЛЦ}}$ — максимальный диаметр циркуляции при максимальном угле перекаладки на левый борт (левой циркуляции судна); β — угол дрейфа судна при движении на циркуляции при максимальном диаметре в направлении, поперечном курсу судна;

$$\text{Д}_{\text{ЗБМл}} = L \sin \beta + B \cos \beta + M + \text{В}_{\text{ЛЦ}}, \quad (9)$$

где $\text{В}_{\text{ЛЦ}}$ — выдвиг судна при выполнении левой циркуляции, т. е. расстояние, проходимое средней точкой судна в направлении первоначального курса от позиции, в которой был отдан приказ на руль, до позиции, когда курс изменится на 90° от своего первоначального значения, м; β — угол дрейфа судна при движении на циркуляции при максимальном диаметре в направлении по курсу судна, град.

Максимальные параметры ЗБМ при выполнении правой и левой циркуляции судна могут быть определены из суммирования $\text{Ш}_{\text{ЗБМп}}$ и $\text{Ш}_{\text{ЗБМл}}$, а также максимальной величины $\text{Д}_{\text{ЗБМп}}$ и $\text{Д}_{\text{ЗБМл}}$. В этом случае можно записать:

$$\begin{aligned} \text{Ш}_{\text{ЗБМц}} &= \text{Ш}_{\text{ЗБМл}} + \text{Ш}_{\text{ЗБМп}}; \\ \text{Д}_{\text{ЗБМл}} &= \max\{\text{Д}_{\text{ЗБМл}}, \text{Д}_{\text{ЗБМп}}\}, \end{aligned} \quad (10)$$

где $\text{Ш}_{\text{ЗБМц}}$ — максимальная ширина ЗБМ судна при выполнении циркуляций на правый и левый борт во избежание непосредственной опасности, м; $\text{Д}_{\text{ЗБМц}}$ — максимальная длина ЗБМ судна при выполнении циркуляций на правый и левый борт во избежание непосредственной опасности, м.

При равенстве углов дрейфа судна в процессе выполнения правой и левой циркуляции выражение для $\text{Ш}_{\text{ЗБМ}}$ может быть записано следующим образом:

$$\text{Ш}_{\text{ЗБМц}} = L \sin \beta + B \cos \beta + 2M + D_{\text{ПЦ}} + D_{\text{ЛЦ}}, \quad (11)$$

Если во избежание непосредственной опасности судно использует маневр реверса, то параметры ЗБМ могут быть определены следующим образом (рис. 5):

$$\text{Ш}_{\text{ЗБМр}} = \frac{L}{2} \sin \theta + \frac{B}{2} \cos \theta + M + \text{Б}_{\text{см.р}}, \quad (12)$$

где $\text{Ш}_{\text{ЗБМр}}$ — ширина зоны безопасного маневрирования при выполнении маневра реверса, м; $\text{Б}_{\text{см.р}}$ — боковое смещение судна при выполнении реверса, м.

Ширина ЗБМ ($\text{Ш}_{\text{ЗБМр}}$) судна при реверсе судна

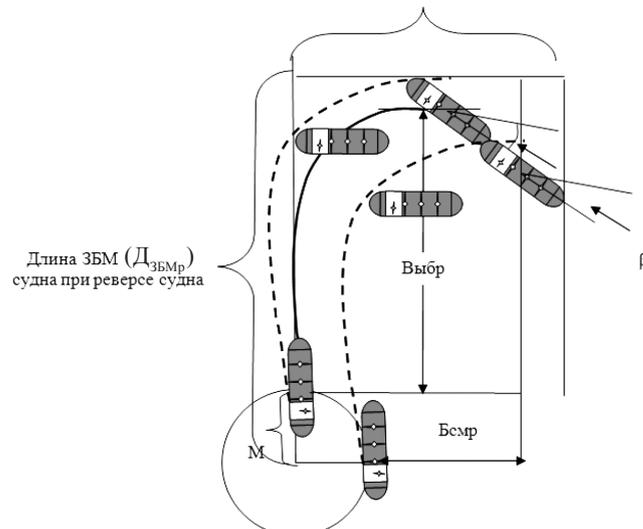


Рис. 5. Определение длины и ширины зоны безопасного маневрирования судна при выполнении маневра реверса на «Полный задний ход»

$$D_{\text{ЗБМр}} = \frac{L}{2} \sin \theta + \frac{L}{2} \cos \theta + M + \text{Выб}_p, \quad (13)$$

где $D_{\text{ЗБМр}}$ — длина зоны безопасного маневрирования при выполнении маневра реверса, м; Выб_p — выбег судна при выполнении реверса, м.

В неподвижной системе координат $X1O1Y1$ (рис. 6) параметры ЗБМ при различном маневрировании судна вправо и влево могут быть определены из следующих основных соотношений:

$$\begin{aligned} Y1_{\text{п}} &= Y1_0 + M + Y1_{\text{сп max}} + \frac{L}{2} \sin \theta + \frac{B}{2} \cos \theta; \\ Y1_{\text{л}} &= Y1_0 - M Y1_{\text{сл max}} - \frac{L}{2} \sin \theta - \frac{B}{2} \cos \theta; \\ Y1_{\text{п}} &= X1_0 + M + X1_{\text{сп max}} + \frac{L}{2} \sin \theta + \frac{B}{2} \cos \theta; \\ Y1_{\text{л}} &= X1_0 + M + X1_{\text{сл max}} + \frac{L}{2} \sin \theta + \frac{B}{2} \cos \theta, \end{aligned} \quad (14)$$

где $X1_0$ — начальная координата по оси $X1$ центра тяжести (ЦТ) судна, м; $Y1_0$ — начальная координата по оси $Y1$ ЦТ судна, м; M — радиальная ошибка обсервованного места судна, м; $X1_{\text{сп max}}$ — максимальное смещение ЦТ судна вдоль оси $X1$ при маневрировании судна вправо, м; $Y1_{\text{сп max}}$ — максимальное смещение ЦТ судна вдоль оси $Y1$ при маневрировании судна вправо, м; $X1_{\text{сл max}}$ — максимальное смещение ЦТ судна вдоль оси $X1$ при маневрировании судна влево, м; $Y1_{\text{сл max}}$ — максимальное смещение ЦТ судна вдоль оси $Y1$ при маневрировании судна влево, м; $Y1_{\text{п}}$ — максимальное значение координаты по оси $X1$ ЗБМ судна при маневрировании вправо с учетом радиальной ошибки обсервованного места (M) и движения кормовой оконечности судна с углом дрейфа β , м; $X1_{\text{л}}$ — минимальное значение координаты по оси $X1$ ЗБМ судна при маневрировании вправо с учетом радиальной ошибки обсервованного места (M) и движения кормовой оконечности судна с углом дрейфа β , м; $Y1_{\text{п}}$ — максимальное значение координаты по оси $Y1$ ЗБМ судна при маневрировании вправо с учетом радиальной ошибки обсервованного места (M) и движения кормовой оконечности судна с углом дрейфа β , м; $Y1_{\text{л}}$ — максимальное значение координаты по оси $Y1$ ЗБМ судна при маневрировании вправо с учетом радиальной ошибки обсервованного места (M) и движения кормовой оконечности судна с углом дрейфа β , м.

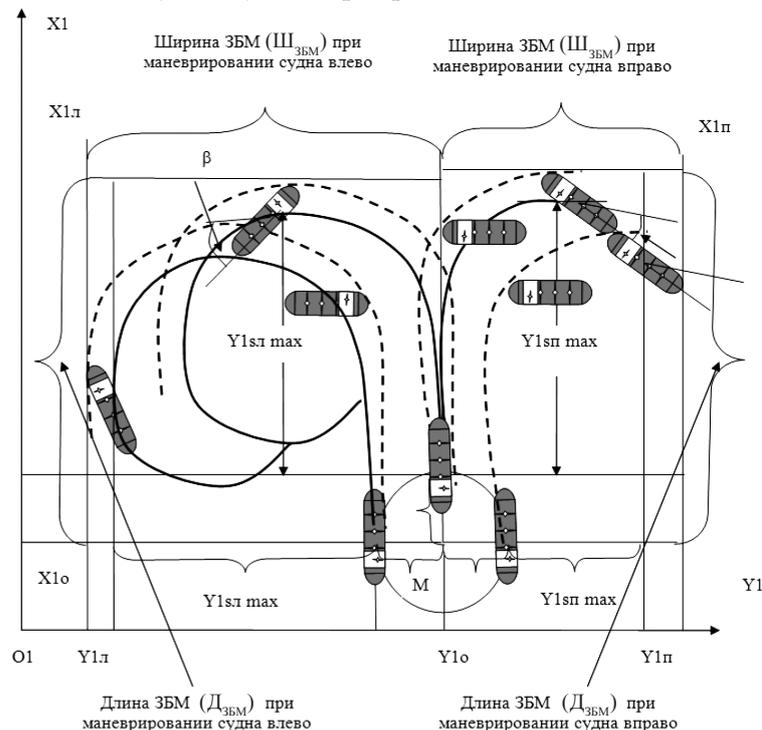


Рис. 6. Определение координат зоны безопасного маневрирования судна в неподвижной системе координат $X1O1Y1$

Движение кормовой оконечности относительно ЦТ при различных углах дрейфа судна β может оказывать существенное влияние на параметры ЗБМ, особенно для судов больших размеров. Максимальные координаты движения ЦТ судна с учетом движения кормовой оконечности в неподвижной системе координат $X1O1Y1$ можно вычислить из соотношений, объединяющих кинематические характеристики движения судна в подвижной системе координат, связанной с судном (xoy), и неподвижной системе координат $X1O1Y1$ (рис. 7):

$$X1_n = X1_0 + M + \max \left\{ \left(\int_0^t (v_x(t) \cos \text{ИК}(t) - v_y(t) \sin \text{ИК}(t) - v_T(t) \cos \gamma_T) dt + \frac{L}{2} \sin \beta + \frac{B}{2} \cos \beta_n \right) \right\};$$

$$X1_n = X1_0 + M + \max \left\{ \left(\int_0^t (v_x(t) \cos \text{ИК}(t) - v_y(t) \sin \text{ИК}(t) - v_T(t) \cos \gamma_T) dt + \frac{L}{2} \sin \beta + \frac{B}{2} \cos \beta_n \right) \right\}; \quad (15)$$

$$Y1_n = Y1_0 + M + \max \left\{ \left(\int_0^t (v_y(t) \cos \text{ИК}(t) + v_x(t) \sin \text{ИК}(t) + v_T(t) \cos \gamma_T) dt + \frac{L}{2} \sin \beta + \frac{B}{2} \cos \beta \right) \right\},$$

$$Y1_n = Y1_0 - M - \max \left\{ \left(\int_0^t (v_y(t) \cos \text{ИК}(t) + v_x(t) \sin \text{ИК}(t) + v_T(t) \cos \gamma_T) dt + \frac{L}{2} \sin \beta + \frac{B}{2} \cos \beta \right) \right\},$$

где $v_y(t), v_x(t)$ — проекции скорости движения судна на подвижные оси координат, связанные с судном (xoy), м/с; $\text{ИК}(t)$ — истинный курс судна, град.; v_T — скорость течения, м/с; γ_T — направление течения, град.; t — интервал (время) интегрирования, с.

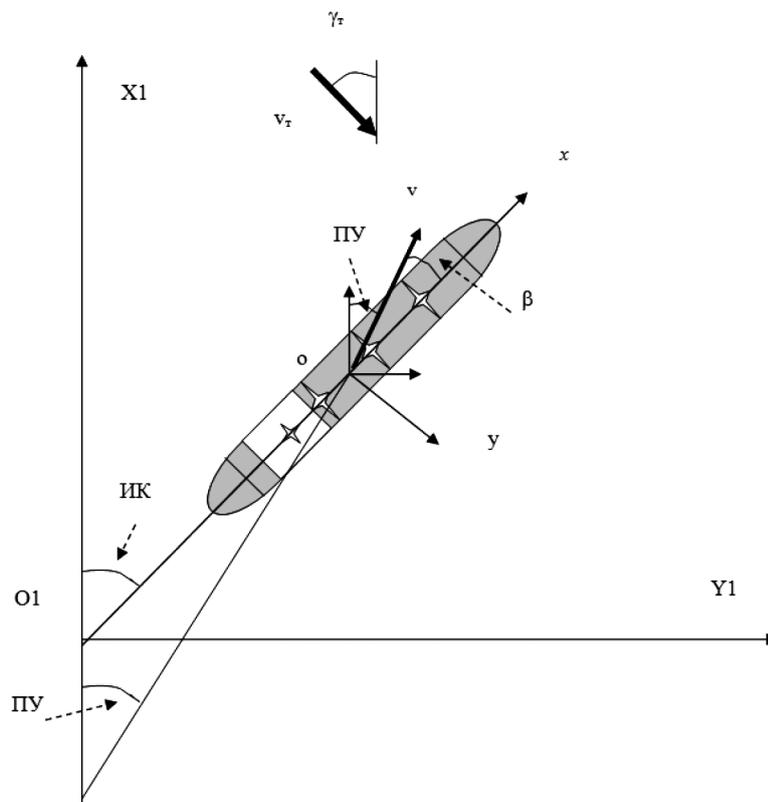


Рис. 7. Движение судна относительно подвижной (xoy) и неподвижной системы координат $X1O1Y1$

Выражения (15) получены исходя из предположения о том, что за время маневра судна скорость и направление течения не изменились. При решении практических задач интервал инте-

грирования t удобно принимать равным, соответственно, 3 мин (180 с), 6 мин (360 с) или времени окончания маневра.

Для определения «трехминутной» ($t = 180$ с) ЗБМ судна выражения (15) примут вид:

$$X1_{\pi} = X1_0 + M + \max \left\{ \left(\int_0^{180} (v_x(t) \cos \text{ИК}(t) - v_y(t) \sin \text{ИК}(t) - v_{\tau}(t) \cos \gamma_{\tau}) dt + \frac{L}{2} \sin \beta + \frac{B}{2} \cos \beta_{\pi} \right) \right\};$$

$$X1_{\pi} = X1_0 + M + \max \left\{ \left(\int_0^{180} (v_x(t) \cos \text{ИК}(t) - v_y(t) \sin \text{ИК}(t) - v_{\tau}(t) \cos \gamma_{\tau}) dt + \frac{L}{2} \sin \beta + \frac{B}{2} \cos \beta_{\pi} \right) \right\};$$

$$Y1_{\pi} = Y1_0 + M + \max \left\{ \left(\int_0^{180} (v_y(t) \cos \text{ИК}(t) + v_x(t) \sin \text{ИК}(t) - v_{\tau}(t) \cos \gamma_{\tau}) dt + \frac{L}{2} \sin \beta + \frac{B}{2} \cos \beta_{\pi} \right) \right\}; \quad (16)$$

$$Y1_{\pi} = Y1_0 + M + \max \left\{ \left(\int_0^{180} (v_y(t) \cos \text{ИК}(t) + v_x(t) \sin \text{ИК}(t) - v_{\tau}(t) \cos \gamma_{\tau}) dt + \frac{L}{2} \sin \beta + \frac{B}{2} \cos \beta_{\pi} \right) \right\},$$

где $0 < t < 180$ с.

ЗБМ судна за 6 мин ($t = 360$ с) маневра на правый (π) и левый (λ) борт может быть определена в виде:

$$X1_{\pi} = X1_0 + M + \max \left\{ \left(\int_0^{360} (v_x(t) \cos \text{ИК}(t) - v_y(t) \sin \text{ИК}(t) - v_{\tau}(t) \cos \gamma_{\tau}) dt + \frac{L}{2} \sin \beta + \frac{B}{2} \cos \beta_{\pi} \right) \right\};$$

$$X1_{\pi} = X1_0 + M + \max \left\{ \left(\int_0^{360} (v_x(t) \cos \text{ИК}(t) - v_y(t) \sin \text{ИК}(t) - v_{\tau}(t) \cos \gamma_{\tau}) dt + \frac{L}{2} \sin \beta + \frac{B}{2} \cos \beta_{\pi} \right) \right\};$$

$$Y1_{\pi} = Y1_0 + M + \max \left\{ \left(\int_0^{360} (v_y(t) \cos \text{ИК}(t) + v_x(t) \sin \text{ИК}(t) - v_{\tau}(t) \cos \gamma_{\tau}) dt + \frac{L}{2} \sin \beta + \frac{B}{2} \cos \beta_{\pi} \right) \right\}, \quad (17)$$

$$Y1_{\pi} = Y1_0 + M + \max \left\{ \left(\int_0^{360} (v_y(t) \cos \text{ИК}(t) + v_x(t) \sin \text{ИК}(t) - v_{\tau}(t) \cos \gamma_{\tau}) dt + \frac{L}{2} \sin \beta + \frac{B}{2} \cos \beta_{\pi} \right) \right\},$$

где $0 < t < 360$ с.

Зона ЗБД, как было определено ранее, представляет собой зону, в пределах которой судно сохраняет свой курс и скорость. Таким образом, ЗБД представляет собой частный случай ЗБМ при $v_y(t) = \text{const}$, $v_x(t) = \text{const}$, $\text{ИК}(t) = \text{const}$.

Характеристики маневрирования в виде ЗБМ и ЗБД, рассчитанные в течение определенного промежутка времени, которые могут быть использованы для решения задач оценки безопасности движения судна и опасности столкновения в узкостях, могут применяться в перспективных видах навигационной техники, так как позволяют оценивать не только движение, но и возможное маневрирование судна.

На начальном этапе внедрения данной технологии в качестве ЗБМ могут использоваться параметры зоны экстремального маневрирования, входящей в Таблицу маневренных характеристик каждого судна в соответствии с Резолюцией ИМО А.601 (15) — см. рис. 1. По мере накопления информации о других судах могут рассчитываться конкретные ЗБМ и ЗБД каждого судна для использования в перспективных навигационных средствах (СРАП, РЛС, БРЛС и др.) при оценке безопасности движения судов в узкостях и при решении задач расхождения судов.

Результаты (Results)

В статье предлагается использование зон безопасного движения и безопасного маневрирования судна для решения проблем обеспечения безопасности движения судов в узкостях и задач расхождения судов. Данный способ использования ЗБМ и ЗБД судна позволяет учитывать не только текущее движение судна, но и его возможное маневрирование за определённый промежуток времени, который можно выбрать равным промежутку вектора движения судна, используемого в современных САРП и РЛС для прогнозирования движения судна и решения задач расхождения. Дополнение этого вектора движения судна параметрами ЗБД и ЗБМ может быть использовано для более точной оценки опасности движения судна в узкости и опасности столкновения для развития навигационной техники и применения в перспективных навигационных средствах (САРП, РЛС, БРЛС).

В предлагаемом исследовании рассматриваются способы определения параметров ЗБД и ЗБМ в течение определённого промежутка времени, а также предлагается на первом этапе внедрения использовать параметры зоны экстремального маневрирования, входящего в информацию о маневренных характеристиках каждого судна (Таблица маневренных элементов) в соответствии с требованиями Резолюции ИМО А.601(15). По мере накопления информации о других судах могут рассчитываться конкретные ЗБМ и ЗБД каждого судна для использования в перспективных навигационных средствах (САРП, РЛС, БРЛС и др.) при оценке безопасности движения судов в узкостях и решении задач расхождения судов. Предлагаемый способ использования маневренных характеристик судна для оценки безопасности движения судов в узкостях может быть применен в том числе для перспективных «беспилотных» судов, управляемых без участия человека.

Обсуждение (Discussion)

Несмотря на развитие современных технологий и проникновение их практически во все сферы деятельности современного морского судна, включая навигацию, управление судном, его механизмами и устройствами, расхождение с другими судами, а также другие проблемы, связанные с навигационными авариями и столкновениями судов в узкостях, остаются актуальными для современного флота.

Проблемам повышения безопасности судов в узкостях было посвящено много работ [1]–[5], [8]–[12], однако наиболее перспективным является использование нейронных сетей в решении задач мореплавания [13]–[16]. Существенным недостатком способов, предлагаемых в этих работах, является то, что они не полностью учитывают параметры возможного маневрирования судов при оценке безопасности движения и решении задач расхождения в узкостях.

В настоящей статье предлагается способ учета параметров маневрирования судна при решении задач обеспечения безопасности судов в узкостях, который может быть использован в развитии судовой навигационной техники, в том числе предназначенной для контроля безопасности движения и решения задач расхождения судов (БРЛС, САРП, РЛС и др.), в том числе для судов, управляемых без участия человека. В общем случае может быть предложено понятие ЗБМ судна, определяемое как часть акватории, внутри которой судно может избежать непосредственной опасности только своим маневром. Другое понятие ЗБД судна может быть определено как зона, в пределах которой судно имеет возможность осуществлять безопасное движение, сохраняя свои курс и скорость.

Параметры зон, в которых судно может осуществлять свое безопасное движение (параметры ЗБД) и / или избежать непосредственной опасности только своим маневром (параметры ЗБМ), применяя для этого в случае необходимости свои экстремальные возможности: реверсирование, уход на циркуляцию с наибольшим углом перекладки руля и другие, зависят от размеров судна, его маневренных характеристик, состояния моря, наличия ветра, течения, оборудования судна ВРШ или ВФШ, загрузки судна, наличия и размеров его палубного груза, скорости движения, осадки носом и кормой и многих других факторов.

Размеры акватории с достаточными глубинами, обеспечивающие безопасность судна в различных ситуациях, должны предоставлять судну возможность движения с постоянным курсом и скоростью, позволять маневрировать в случае возникновения опасности, а при необходимости

обеспечивать возможность выполнения экстремального маневрирования во избежание непосредственной опасности определяются параметрами ЗБД и ЗБМ конкретного судна. Также использование ЗБД и ЗБМ позволяет судоводителю планировать и осуществлять маневры для расхождения с учетом маневренных возможностей как своего, так и других судов.

Предлагаемый в настоящей статье способ использования ЗБД и ЗБМ для оценки безопасности движения судов в узкостях и решения задач расхождения судов может быть использован в том числе для перспективных «беспилотных» судов, управляемых без участия человека.

Выводы

1. Предлагаемый в настоящей статье способ, основанный на использовании параметров ЗБД и ЗБМ для решения проблем обеспечения безопасности движения в узкостях и задач расхождения судов, может применяться при создании новой и развитии существующей навигационной техники (СРАП, РЛС, БРЛС и др.).

2. Предлагаемый способ использования ЗБМ и ЗБД судна позволяет учитывать не только текущее движение судна, но и его возможное маневрирование в течение определенного промежутка времени, который может быть равен промежутку вектора движения судна, используемого в современных СРАП и РЛС для прогнозирования движения судна и решения задач расхождения.

3. Характеристики маневрирования в виде ЗБМ и ЗБД, рассчитанные в течение определённого промежутка времени, могут быть использованы при решении задач оценки безопасности движения судна и опасности столкновения в узкостях в перспективных видах навигационной техники, так как позволяют оценивать не только движение, но и возможное маневрирование своего и другого судна (судов).

4. На первом этапе внедрения ЗБМ рекомендуется использовать параметры зоны экстремального маневрирования, входящего в информацию о маневренных характеристиках каждого судна (Таблицу маневренных элементов) в соответствии с требованиями Резолюции ИМО А.601(15).

5. По мере накопления информации о других судах могут рассчитываться конкретные ЗБМ и ЗБД каждого судна для их дальнейшего использования в перспективных навигационных средствах (СРАП, РЛС, БРЛС и др.) при оценке безопасности движения судов в узкостях и решении задач расхождения судов.

6. Предлагаемый способ использования маневренных характеристик судна для оценки безопасности движения судов в узкостях может быть использован в том числе для перспективных «беспилотных» судов, управляемых без участия человека.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кондратьев С. И. Полифакторный анализ процесса предупреждения столкновения судов / С. И. Кондратьев, А. Л. Боран-Кешишьян // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2013. — № 2 (21). — С. 7–13.

2. Некрасов С. Н. Определение навигационных рисков при имитационном моделировании управления судном при проходе узкости / С. Н. Некрасов, К. И. Ефимов, Д. В. Трененков // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2014. — № 1 (23). — С. 34–36.

3. Бурмака И. А. Управление группой судов в ситуации опасного сближения / И. А. Бурмака, А. Ю. Булгаков // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2014. — № 6 (28). — С. 1–13.

4. Некрасов С. Н. Вычисление гарантированного курса расхождения при опасности сближения вплотную / С. Н. Некрасов, Д. В. Трененков, К. И. Ефимов // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2015. — № 1 (29). — С. 1–15. DOI: 10.21821/2309-5180-2015-7-1-1-15.

5. Некрасов С. Н. Навигационные риски буксировки судна в стесненных навигационных условиях / С. Н. Некрасов, К. И. Ефимов, Д. В. Трененков // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2014. — № 6 (28). — С. 13–19.

6. Ершов А. А. Использование зон безопасного расхождения для движения судов на подходах к портам и внутренних водных путях // Сб. науч. тр. проф.-преп. сост. ГУМРФ им. адм. С. О. Макарова. — СПб.: Изд-во ГУМРФ им. адм. С. О. Макарова, 2014. — С. 6–13.

7. Паринов П. П. Новые способы обеспечения безопасного движения судов в Большом порту Санкт-Петербург и на подходах к порту: дис. ... канд. техн. наук: 05.22.19; защищена 21.12.2010; утв. 12.06.2011 / Петр Петрович Паринов. — СПб., 2010. — 120 с.

8. Ершов А. А. Разработка системы интеллектуальной поддержки судоводителя для снижения опасности столкновений судов: дис. ... д-ра техн. наук: 05.22.19; защищена 19.11.2012; утв. 20.05.2013 / Андрей Александрович Ершов. — СПб., 2012. — 366 с.

9. Hasegawa K. On harbor maneuvering and neural control system for berthing with tug operation / K. Hasegawa, T. Fukutomi // Proc. 3rd International Conference on Manoeuvring and Control of Marine Craft. — 1994. — Pp. 197–210.

10. Kijima K. A. Ship Manoeuvring Motion in the Proximity of Pier / K. Kijima, Y. Furukawa // Manoeuvring and Control of Marine Craft (MCMC'94). 3rd International Conference. — Southampton, UK, 1994. — Pp. 211–222.

11. Zubova A. A. Methodology for the Ship to Ship Hydrodynamic interaction Investigation Applying the CFD Methods / A. A. Zubova, D. V. Nikushchenko // Proceedings of the 11th International Conference on Hydrodynamics (ICHHD 2014). — Singapore, 2014. — Pp. 328–340.

12. Zubova A. A. Hydrodynamic interaction phenomena investigations during the ship overtaking maneuver for marine related simulators with the use of CFD methods / A. A. Zubova, D. V. Nikushchenko // Proceedings of International Conference on Marine Simulation and Ship Manoeuvrability 2015 (MARSIM 2015). — Curran Associates, Inc., 2016. — Pp. 672–684.

13. Guliyev N. J. On the approximation by single hidden layer feedforward neural networks with fixed weights / N. J. Guliyev, V. E. Ismailov // Neural Networks. — 2018. — Vol. 98. — Pp. 296–304. DOI: 10.1016/j.neunet.2017.12.007.

14. Haykin S. S. Neural Networks and Learning Machines / S. S. Haykin. — Third Edition. — Upper Saddle River, NJ, USA: Pearson, 2009. — 906 p.

15. Дерябин В. В. Нейро-нечёткая модель счисления пути судна / В. В. Дерябин, А. Е. Сазонов // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2015. — № 4 (32). — С. 1–16.

16. Дерябин В. В. Нейронная сеть как алгоритм прогноза скорости дрейфа судна // Вестник компьютерных и информационных технологий / В. В. Дерябин. — 2015. — № 6 (132). — С. 11–17. DOI: 10.14489/vkit.2015.06.pp.011-017.

REFERENCES

1. Kondrat'ev, S. I., and A. L. Boran-Keshish'yan. "Multifactorial analysis of ships collision prevention process." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova* 2(21) (2013): 7–13.

2. Nekrasov, S. N., K. I. Efimov, and D. V. Trenenkov. "Navigational risks calculation when modeling of sailing through the narrows." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova* 1(23) (2014): 34–36.

3. Burmaka, I. A., and A. Yu. Bulgakov. "Management of the group of vessel in the situation of dangerous approach." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova* 6(28) (2014): 1–13.

4. Nekrasov, S. N., D. V. Trenenkov, and K. I. Efimov. "Vychislenie garantirovannogo kursa raskhozheniya pri opasnosti sblizheniya vplotnuyu." *Vestnik Gosudarstvennogo uni-versiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova* 1(29) (2015): 1–15. DOI: 10.21821/2309-5180-2015-7-1-1-15.

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

6. Ershov, A. A. "Usage zones of safe passage in approaches to ports and inland waterways." *Sb. nauch. tr. prof.-prep. sost. GUMRF im. adm. S. O. Makarova*. SPb.: Izd-vo GUMRF imeni admirala S. O. Makarova, 2014: 6–13.

7. Parinov, P. P. *Novye sposoby obespecheniya bezopasnogo dvizheniya sudov v Bol'shom portu Sankt-Peterburg i na podkhodakh k portu*. PhD diss. SPb., 2010.
8. Ershov, A. A. *Razrabotka sistemy intellektualnoj podderzhki sudovoditelja dlja snizhenija opasnosti stolknovenij sudov*. Dr. diss. SPb., 2012.
9. Hasegawa, Kazuhiko, and T. Fukutomi. "On harbor maneuvering and neural control system for berthing with tug operation." *Proc. 3rd International Conference on Manoeuvring and Control of Marine Craft*. 1994: 197–210.
10. Kijima, K., and Y. Furukawa. "A Ship Manoeuvring Motion in the Proximity of Pier." *Manoeuvring and Control of Marine Craft (MCMC'94). 3rd International Conference*. Southampton, UK, 1994: 211–222.
11. Zubova, A. A., and D. V. Nikushchenko. "Methodology for the Ship to Ship Hydrodynamic interaction Investigation Applying the CFD Methods." *Proceedings of the 11th International Conference on Hydrodynamics (ICHD 2014)*. Singapore, 2014: 328–340.
12. Zubova, A. A., and D. V. Nikushchenko. "Hydrodynamic interaction phenomena investigations during the ship overtaking maneuver for marine related simulators with the use of CFD methods." *Proceedings of International Conference on Marine Simulation and Ship Manoeuvrability 2015 (MARSIM 2015)*. Curran Associates, Inc., 2016: 672–684.
13. Guliyev, Namig J., and Vugar E. Ismailov. "On the approximation by single hidden layer feedforward neural networks with fixed weights." *Neural Networks* 98 (2018): 296–304. DOI: 10.1016/j.neunet.2017.12.007
14. Haykin, S. S. *Neural Networks and Learning Machines*. Third Edition. Upper Saddle River, NJ, USA: Pearson, 2009.
15. Deryabin, V. V., and A. E. Sazonov. "Neuro-fuzzy vessel's dead reckoning model." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admiralov S.O. Makarova* 4(32) (2015): 1–16.
16. Deryabin, V.V. "Neural Network Algorithm of Vessel's Drift Speed Prediction." *Herald of computer and information technologies* 6(132) (2015): 11–17. DOI: 10.14489/vkit.2015.06.pp.011-017.

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
Михневич Андрей Викторович — аспирант
Научный руководитель:
Ершов Андрей Александрович
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени
адмирала С. О. Макарова»
198035, Российская Федерация, Санкт-Петербург,
ул. Двинская, 5/7
e-mail: kaf_mus@gumrf.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Ershov, Andrey A. —
Dr. of Technical Sciences, associate professor
Admiral Makarov State University of Maritime
and Inland Shipping
5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg 198035,
Russian Federation
e-mail: ershov_63@mail.ru, kaf_mus@gumrf.ru
Mikhnevich, Andrey V. — postgraduate
Supervisor:
Ershov, Andrey A.
Admiral Makarov State University of Maritime
and Inland Shipping
5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg 198035,
Russian Federation
e-mail: kaf_mus@gumrf.ru

*Статья поступила в редакцию 13 сентября 2018 г.
Received: September 13, 2018.*

DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-5-911-921

FEATURES OF VISUAL PERCEPTION OF NAVIGATION INFORMATION IN BAYS WITH HILLY RELIEF OF THE COAST AND THEIR INFLUENCE ON THE SAFETY OF NAVIGATION

S. V. Ermakov

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

The presented work is devoted to the study of the process of navigational situation estimation by the navigator, connected with the subjectivism of this process. The article analyzes the problem of visual illusions, which can be manifested in the closed water area of sea bays bordered by a hilly coast. For analysis, the narrow and extensive Loch Broome bay, located on the west coast of Scotland, is used, a brief linguistic and visualized description of the bay is given. The general principles of perception of visual information are considered, the description of the phenomenon of illusion is given and its effects on the safety of navigation are analyzed with examples. Features of the visual perception of space in the bay of Loch Broome are considered in detail. The causes of optical illusion, due to which the navigator perceives the dimensions of the water area when swimming in this bay is less than real, are revealed and analyzed. It is the color, light and background effects. An assessment of the possible negative consequences of inadequate perception of the size of the bay was made. This consequences was associated, first of all, with the insufficient psychological stability of the navigator. It is shown that increased anxiety, which can arise due to inadequate perception by the navigator of the size of the water area, is a source of unjustified decisions and wrong actions and, as a consequence, a navigation accident. As a result, recommendations for navigation in Loch Broome and in similar bays with a hilly relief of the coast were formulated. These recommendations are aimed at minimizing the manifestation of optical illusions and preventing the occurrence of related navigation problems. The considered features of visual perception and founded recommendations have both a private and a general character. They can be included both in the sailing directions of the investigated water area (i.e. in this case in the Loch Broom sailing directions), so after adaptation — in the sailing directions of other similar water areas. In addition, the provisions of this work can be used in further studies of the perception of navigational information as a safety navigation factor.

Keywords: visual perception of space, illusion, bay, hilly coast, navigation, safety, recommendations.

For citation:

Ermakov, Sergey V. "Features of visual perception of navigation information in bays with hilly relief of the coast and their influence on the safety of navigation." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova* 10.5 (2018): 911–921. DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-5-911-921.

УДК 656.61.052

ОСОБЕННОСТИ ЗРИТЕЛЬНОГО ВОСПРИЯТИЯ НАВИГАЦИОННОЙ ИНФОРМАЦИИ В БУХТАХ С ХОЛМИСТЫМ РЕЛЬЕФОМ ПОБЕРЕЖЬЯ И ИХ ВЛИЯНИЕ НА БЕЗОПАСНОСТЬ ПЛАВАНИЯ

С. В. Ермаков

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

Настоящая работа посвящена исследованию процесса оценивания навигационной ситуации судоводителем, связанного с субъективизмом этого процесса. В статье проанализирована проблема зрительных иллюзий, которые могут проявиться в замкнутых акваториях морских бухт, окаймленных холмистым побережьем. Для анализа использована узкая и протяженная бухта Лох-Брум, расположенная на западном побережье Шотландии, приведено краткое лингвистическое и визуализированное описание бухты. Рассмотрены общие принципы визуального восприятия информации, включая её получение и обработку,

приведено общее описание явления иллюзии и на примерах проанализировано его влияние на безопасность мореплавания. Подробно рассмотрены особенности визуального восприятия пространства в бухте Лох-Брум. Выявлены и проанализированы причины появления оптической иллюзии, вследствие которой судоводитель воспринимает размеры акватории при плавании в этой бухте меньше реальных, а именно: цветовой, световой и фоновый эффекты. Проведена оценка возможных негативных последствий неадекватного восприятия размеров бухты, связанных, в первую очередь, с недостаточной психологической устойчивостью судоводителя. Показано, что повышенная тревожность, которая может возникнуть из-за неадекватного восприятия судоводителем размеров акватории, является источником неоправданных решений и неправильных действий и, как следствие, навигационной аварии. В итоге сформулированы рекомендации по навигации в бухте Лох-Брум и в подобных бухтах с холмистым рельефом побережья, направленные на минимизацию проявления оптических иллюзий и предупреждение возникновения связанных с ними проблем навигации. Рассмотренные особенности зрительного восприятия и обоснованные рекомендации имеют как частный, так и общий характер. Они могут быть включены в лоцию исследованной акватории (в данном случае в лоцию бухты Лох-Брум), а после адаптации — в лоцию других схожих акваторий. Кроме того, положения настоящей работы могут быть использованы в дальнейших исследованиях восприятия навигационной информации как фактора безопасности мореплавания.

Ключевые слова: зрительное восприятие пространства, иллюзия, бухта, холмистое побережье, навигация, безопасность, рекомендации.

Для цитирования:

Ермаков С. В. Особенности зрительного восприятия навигационной информации в бухтах с холмистым рельефом побережья и их влияние на безопасность плавания / С. В. Ермаков // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2018. — Т. 10. — № 5. — С. 911–921. DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-5-911-921.

Введение (Introduction)

Основным критерием оптимальности судовождения, как и мореплавания в целом, является безопасность, которая обеспечивается среди прочего качеством решений, принимаемых вахтенным помощником капитана (ВПК). В районах со стесненными условиями плавания большинство своих решений ВПК, как правило, вынужден генерировать при крайней ограниченности времени и пространства, а также на фоне эмоциональной напряженности, возникновение и динамика которой зависят от сложности навигационной ситуации.

Очевидно, что при плавании в стесненных условиях достоверность того объема информации, которая имеется в распоряжении ВПК, является основополагающим для безопасности фактором. В этих условиях любое неправильное решение, ставшее таковым из-за лежащей в его основе недостоверной информации, и последующие действия по его реализации являются потенциальным источником навигационной аварии. У судоводителя, выполняющего обязанности по несению ходовой навигационной вахты, практически не остается ни времени, ни пространства, чтобы скорректировать это решение.

Вместе с тем в основе решения ВПК, как правило, лежит не объективная информация, а результат ее восприятия и переработки самим судоводителем. В полной мере это относится и к информации о размерах акватории, которые являются в своей совокупности компонентом навигационной ситуации [1], [2]. Предварительную оценку размеров новых для себя акваторий вахтенный помощник капитана производит, как правило, на основании морских навигационных карт и лоций. Однако указанные источники описывают любую стесненную акваторию, представляя ее размеры такими, каковыми они являются на самом деле. Если для объективной оценки навигационной ситуации такой подход является не только оправданным, но и единственно правильным, то для анализа стрессогенности обстоятельств и условий плавания необходимо «видеть акваторию» глазами судоводителя, т. е. принимать к анализу ее размеры такими, какими их воспринимает судоводитель. При штурманском способе судовождения представление акватории плавания судоводителем практически не отличается от её объективной сущности (образ объекта совпадает с самим объектом), во всяком случае, в тех элементах, которые являются значимыми для навигационной безопасности.

Несколько иначе обстоит дело в случае использования лоцманского (глазомерного) способа. Существуют такие акватории, размеры которых при визуальной оценке судоводителем будут восприниматься отличными от действительных. Это связано как с характеристиками самой акватории (ее конфигурацией, рельефом побережья и др.), так и с особенностями восприятия и переработки зрительной информации человеком (судоводителем). Одной из таких акваторий, например, является узкая и протяженная бухта Лох-Брум на западном побережье Шотландии (рис. 1–3). Суда отечественного рыболовецкого флота во времена пика его развития очень часто заходили в эту бухту. Так, именно в бухте Лох-Брум в 70–80-е гг. XX в. стояли на якоре и осуществляли деятельность по приему свежей рыбы от местных маломерных рыболовных судов отечественные плавбазы и производственные рефрижераторы «Рудный», «Пионерск» и др. После переработки полученная рыбопродукция с целью ее дальнейшей транспортировки перегружалась на транспортные рефрижераторы «Уральские горы», «Лазурный берег» и др.

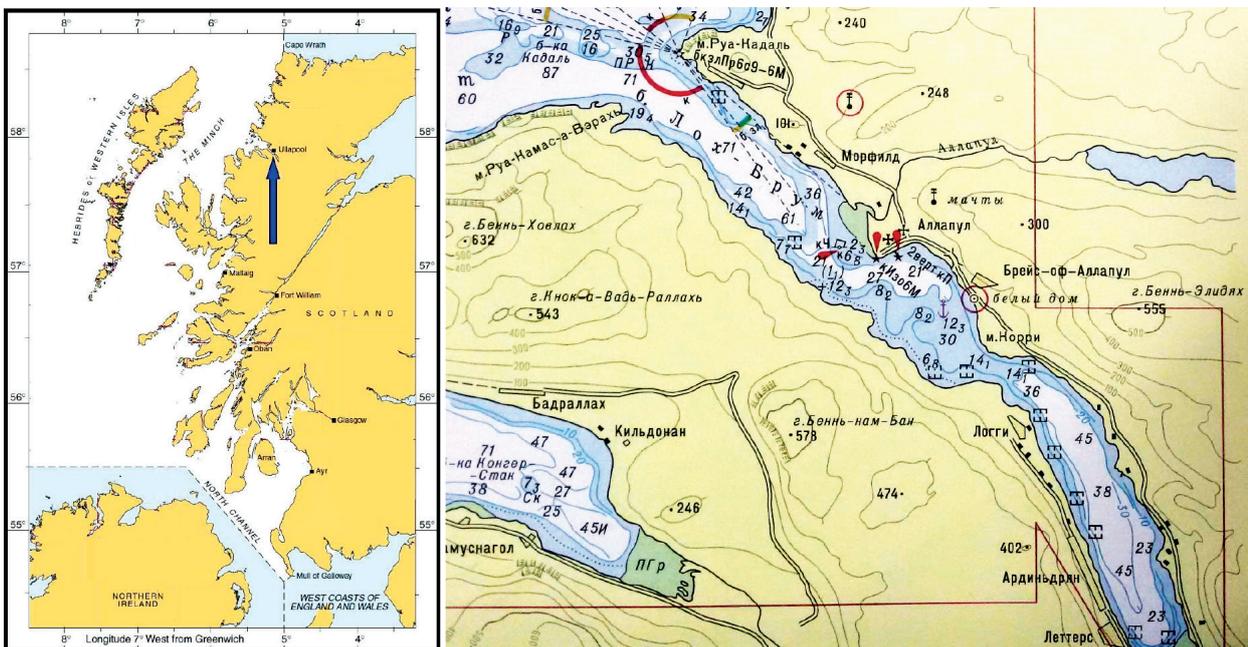


Рис. 1. Бухта Лох-Брум



Рис. 2. Бухта Лох-Брум со стороны порта Аллапул



Рис. 3. Бухта Лох-Брум глазами судоводителя

Источником настоящего исследования являются судоводители, имевшие непосредственное отношение к описанной производственной деятельности отечественных судов и указавшие на особенности своего личного визуального восприятия размеров бухты Лох-Брум. Несмотря на то, что к настоящему времени подобная деятельность судов отечественного рыбопромыслового флота прекращена, бухта Лох-Брум остается удобным местом якорной стоянки и укрытия для морских судов различных размеров и типов.

Восприятие навигационной информации не является новым объектом исследования, проблема ее адекватности рассматривалась, например, в работах [3], [4]. Вместе с тем настоящее исследование отличается, во-первых, своим предметом — «искажение» при визуальной оценке судоводителем реальных размеров бухты с холмистым рельефом побережья как частный случай неадекватного восприятия информации (на примере бухты Лох-Брум). Во-вторых, оно дополняет существующие исследования тем, что указанная проблема здесь рассматривается не только через призму прямой и непосредственной причинно-следственной связи: «неадекватное восприятие информации — ошибочное решение», но и через включение в эту цепочку в качестве промежуточного звена завышения стрессогенности условий плавания. Кроме того, цель исследования обладает исключительно практической значимостью — необходимостью обоснования рекомендаций судоводителям по заходу и плаванию в бухте Лох-Брум в части, касающейся объективизации информации о размерах акватории плавания.

Методы и материалы (Methods and Materials)

Исследуемая проблема неадекватного восприятия навигационной информации может возникнуть в любой протяженной бухте с холмистым рельефом побережья, а бухта Лох-Брум

в этом контексте является «испытуемым образцом». Узкая и вытянутая на 8 миль приблизительно в направлении SE бухта Лох-Брум является ответвлением широкого залива, расположенного на северо-западном побережье Шотландии и граничащего с проливом Норт-Минч. Берега бухты Лох-Брум гористые и имеют наибольшую высоту над уровнем моря — 576 м (гора Бейн-нам-Бан), во многих местах они окаймлены осыхающими рифами и отмелями [5]–[7]. Таким образом, особенности бухты Лох-Брум дают основание считать ее стесненной акваторией (узкостью), т. е. районом, ограниченным в навигационном отношении различными опасностями, которые находятся в непосредственной близости от фарватеров. Плавание в таких районах, как правило, сопряжено с необходимостью использования лоцманского (глазомерного) метода судовождения. В свою очередь, применение этого метода тесно связано с процессом зрительного восприятия вахтенным помощником капитана навигационной информации и адекватностью результата этого восприятия условиям и обстоятельствам плавания. Вместе с тем в большинстве исследований, посвященных плаванию судна в узкости, к числу которых относятся, например, публикации [8], [9], восприятие не рассматривается как фактор безопасности плавания.

Восприятие, перцепция (от лат. perceptio) — это познавательный процесс в отношении явлений и предметов реального окружающего мира, основанный на использовании органов чувств (сенсоров) человека (судоводителя). Результатом этого процесса является образ, сформированный в его сознании и представляющий собой субъективное отражение объективной картины (навигационной ситуации). В итоге процесса восприятия в сознании человека формируется образ, т. е. субъективное отражение реальности, воспринимаемой органами чувств [10]. Именно на основе сформированного образа ВПК производит оценку навигационной ситуации и принимает решение о своих дальнейших действиях в отношении управления судном. Таким образом, под восприятием следует понимать совокупность последовательных процессов получения, осознания и понимания данных, принятых его сенсорами. Обработка данных мозгом происходит параллельно с визуальным восприятием — сеть нейронов активирует одновременно разные участки мозга, поэтому реакция последнего характеризуется минимальной задержкой по времени [11].

Восприятие информации человеком — это интеграция двух разнонаправленных процессов мозга: *восходящего* и *нисходящего* [11]. Восходящий процесс инициируется внешними раздражителями, т. е. тем, что человек видит. Глазное дно способно фокусироваться исключительно на небольшой площади, по этой причине человек видит только вследствие того, что его глаза осуществляют последовательные прерывистые движения. При этом представление об окружающем мире строится по принципу панорамы — взгляд скачкообразно перемещается от объекта к объекту, при этом человек не прилагает к этому сознательных усилий.

Получение данных состоит из нескольких этапов (стадий). Сначала глаз человека замечает движение, а затем уже форму, цвет, контур и контраст. На первой стадии обработки мозг дискретно считывает информацию, на последующих стадиях происходит группировка информации в элементы, которые, в свою очередь, структурируются в некоторые базовые формы. Процесс с таким алгоритмом протекает в течение очень короткого промежутка времени и лежит в основе распознавания объектов. Информация считывается и передается в другие отделы мозга, при этом оказывая влияние на направление перемещения внимания [11].

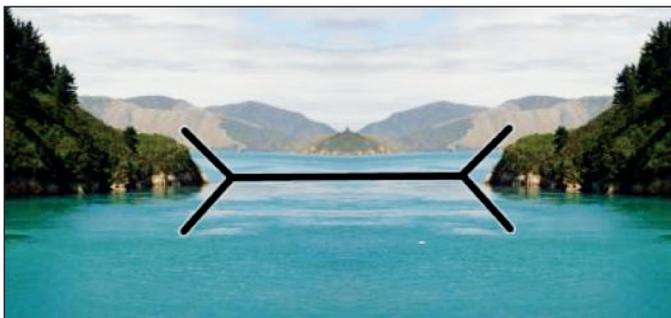
Основой нисходящего процесса обработки являются имеющиеся знания и ожидания субъекта восприятия, а также сформированные на момент восприятия конкретные его цели. Мозг соотносит воспринимаемую зрением информацию с известными формами и образами и определяет дальнейший объект зрительного наблюдения, при этом объекты, не имеющие отношение к цели наблюдения, игнорируются. Таким образом, нисходящий процесс восприятия характеризуется тем, что умом человек «видит» больше, чем глазами, его знания, ожидания и готовность принять определенное решение оказывают значительное влияние на формируемый в сознании образ. Степень соответствия этого образа реальной действительности определяется вероятностью того, что человек вспомнит необходимую на данный момент информацию. В свою очередь, такая вероятность зависит от глубины обработки информации, воспринимаемой

органами чувств. Процесс восприятия информации имеет нисходящий характер в тех случаях, когда существует необходимость сформировать представление о большой картине, состоящей из малых деталей. Итогом такого восприятия является обдуманное предположение, основанное на ожиданиях, убеждениях, а также имеющихся знаниях и опыте.

Большая часть информации (почти 90 %), получаемой человеком через органы зрения, до мозговых центров анализа и обработки не доходит. Построению образа объективной реальности здесь способствуют именно знания и опыт, т. е. информация, которая уже имела до процесса восприятия. Таким образом, воспринимаемая визуальная информация и хранящиеся в памяти сведения об объекте восприятия соединяются, создавая в результате некоторый образ окружающего мира, построенный на контекстуальной информации.

Кроме того, на течение процесса восприятия судоводителем навигационной информации большое влияние оказывает явление *иллюзии* [3], [4]. Иллюзия — это ложное или искаженное восприятие окружающей действительности, которое заставляет наблюдателя испытывать впечатления, не соответствующие действительности, и склоняет его к ошибочным суждениям об объекте восприятия. Термин «искаженное» означает, что видимое не соответствует объективной ситуации [12]. Одним из примеров проявления иллюзии в профессиональной деятельности судоводителя является искажение восприятия поперечных размеров узкости [3], [4]. Покатое побережье создает видимость широкого прохода (рис. 4, а), и, наоборот, мосты, выполненные в виде арок, визуально «сужают» проход, причем иллюзия усиливается наличием отражения моста в воде (рис. 4, б).

а)



б)

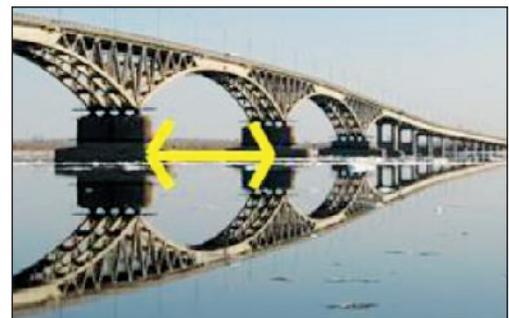


Рис. 4. Иллюзия восприятия ширины прохода:
а — пологие берега; б — арки моста, отражающиеся в воде

В обоих случаях имеет место *иллюзия Мюллера-Лайера* [13], которая заключается в зависимости восприятия длины линии от направления стрелок на ее концах. Если стрелки направлены внутрь линии, то последняя выглядит длиннее по сравнению с линией без стрелок. Наоборот, в случае, когда стрелки направлены наружу, линия визуально «укорачивается».

Предметы и явления реальности существуют в пространстве и во времени. Следовательно, неотъемлемой частью любого процесса зрительного восприятия является субъективное считывание пространственных и временных отношений между предметами, причем в некоторых случаях эти отношения сами являются объектом восприятия.

Восприятие пространства представляет собой процесс и результат отображения формы и величины, т. е. пространственных характеристик, взаимного расположения (пространственных отношений) и движения предметов реальности. Этот процесс, являющийся очень сложным, включает в себя постоянное сопоставление размеров предметов, его изображения на сетчатке и расстояния до предмета. Например, по мере удаления предметов от наблюдателя их изображения на сетчатке глаза уменьшаются по величине. Поэтому большие по размерам предметы воспринимаются как находящиеся ближе, чем аналогичные предметы меньшей величины [14]. Однако окончательный образ строится не только на основе текущих зрительных ощущений, но и с учетом представлений об объекте восприятия, полученных из предыдущего опыта.

Когда размеры и форма воспринимаемого объекта известны, оценка расстояния базируется на соотношении ощущаемых размеров с реальной величиной объекта. Если объект, размеры которого достоверно неизвестны, находится рядом с объектами, в отношении величин которых, наоборот, сомнений нет, то расстояние до первого оценивается косвенно, из сопоставления со вторыми. При большом расстоянии до объекта неизвестной величины могут возникать значительные погрешности в оценке этого расстояния. Подобный оптический эффект можно назвать *фоновым*. Отражаемый предметами свет частично поглощается воздухом. Поэтому отдаленный объект, из-за наличия большого воздушного пространства до него, видится более тусклым и расплывчатым по сравнению с расположенными ближе объектами. У относительно близко расположенных объектов контуры имеют более резкий и определенный характер, у удаленных объектов они практически незаметны.

Большое влияние на адекватность восприятия судоводителем акватории плавания имеет ее цветовая гамма. Цвет может зрительно сокращать или удлинять, расширять или сужать пространство, вызывая *цветовой эффект*. В таком контексте все цвета можно разделить на *выступающие* (уменьшающие пространство) и *отступающие* (увеличивающие пространство). К первой группе относятся поверхностные, теплые, насыщенные, интенсивные, броские, плотные, тяжелые, фактурные цвета: темно-красный, красно-коричневый, оранжевый, желтый, черный и др. Вторую группу составляют независимые, холодные, светлые, малонасыщенные, неброские, легкие, малофактурные цвета: светло-голубой, синий, зеленый, белый, серый и др. Воздействие отдельного цвета тем сильнее, чем больше занимаемая им поверхность, чем он ярче и насыщенней.

Результаты (Results)

Конфигурация бухты Лох-Брум, холмистый рельеф ее побережья и особенности зрительного восприятия навигационной информации являются источниками неадекватного зрительного восприятия и оптических иллюзий. Во-первых, в рассматриваемой бухте характерно проявление *фонового эффекта*. В ясную погоду, когда воздух чист, прибрежные холмы и горы кажутся значительно ближе, чем они находятся в действительности, особенно, если между ними и наблюдателем расположены значительно более мелкие объекты, такие, например, как строения селения Аллапул. Во-вторых, наличие еще одной оптической иллюзии в бухте Лох-Брум, которая оказывает влияние на восприятие ее размеров (размеров судоходной части), связано с «игрой теней и отражений». Тень, отбрасываемая прибрежными холмами на поверхность воды, создает ощущение резкого отличия глубин в теневой и освещенной части поверхности. В одних условиях освещенности теневая зона может быть воспринята как глубоководная, в других — как мелкоководная. Этот оптический эффект можно назвать *световым*.



Рис. 5. Тени и отражения на поверхности воды в бухте Лох-Брум

Отражение прибрежных холмов на водной поверхности как бы «размывает» визуальное восприятие линии берега, «сдвигая» ее в сторону линии движения судна и «уменьшая» ширину фарватера (рис. 5). Использование кавычек в данном случае подразумевает, что описанное явление отсутствует в реальной действительности, а существует только в образе, формируемом у судоводителя в процессе обработки визуальной зрительной информации. Описанный цветовой эффект усиливает восприятие судоводителем размеров бухты, отличными от действительных. Коричневый цвет прибрежных холмов является источником цветовой оптической иллюзии уменьшения пространства и замкнутости.

Результатом проявления оптических иллюзий в бухте Лох-Брум является неадекватное восприятие судоводителем ее размеров. Окружающие бухту холмы ощущаются намного ближе, чем это есть на самом деле, а их отражение на поверхности воды может простираться на несколько кабельтовых от берега. Таким образом, элементы рельефа побережья как бы «сжимают» акваторию бухты, и судоводитель субъективно воспринимает безопасную для навигации (маневрирования, постановки на якорь) акваторию значительно меньшей, чем она объективно представляется на картах, в логиях и посредством радиолокационных измерений и наблюдений.

Один из базовых принципов судовождения — *держаться ближе к опасности* — здесь не работает, в первую очередь, из-за опасности асимметрии иллюзии (асимметрии восприятия расстояния до берега). Один берег и присущие ему опасные глубины могут восприниматься ближе, чем другой берег, хотя объективно имеет место обратная картина. Любые интуитивные маневры в сторону от берега, кажущегося ближе, могут привести судно к опасным глубинам у другого берега.

Обсуждение (Discussion)

Самое опасное следствие свойственной бухте Лох-Брум оптической иллюзии связано с психологической устойчивостью судоводителя, которая является активным сложным целостным системным психическим образованием, определяющим его реакцию на определенную ситуацию и включающим в себя следующие три взаимосвязанных составляющих (способностей) [15]:

- *стойкость* (стабильность, способность сохранять себя в изменяющихся условиях) — способность противостоять негативному воздействию внешней среды, сохранять веру в себя в ситуациях фрустрации, постоянный, достаточно высокий уровень настроения;
- *уравновешенность* — соразмерность внешних условий и ответной реакции на них со стороны судоводителя;
- *сопротивляемость* — способность противостоять всему, что может ограничить свободу принятия решений.

Далее будем считать, что экстремальной навигационной ситуацией в работе судоводителя является такая совокупность обстоятельств и условий плавания, которая вызывает у судоводителя в силу его недостаточной психологической устойчивости стресс, а также ставит неразрешимые или трудноразрешимые задачи и поэтому несёт угрозу безопасности судна, экипажа и окружающей среды. В данном контексте экстремальность навигационной ситуации — это степень того, насколько ситуация является экстремальной в смысле данного определения.

При маневрировании на ограниченной акватории в значительной мере возрастают чувства беспокойства и раздражения. Здесь на передний план как раз выходит психологическая устойчивость судоводителя, находящегося в конкретной навигационной ситуации, т. е. экстремальность навигационной ситуации. Однако субъективная оценка размеров бухты приводит к повышению экстремальности, так как судоводитель осуществляет маневрирование на акватории «воспринимаемых», т. е. меньших, а не реальных размеров. Вместе с экстремальностью увеличивается и вероятность навигационной аварии. Вахтенный помощник в лучшем случае осуществляет лишние (и, как правило, небезопасные) действия, в худшем — степень неадекватности реакции (действий и решений) на внешние условия судоводителя с недостаточной психологической устойчивостью может инициировать навигационную аварию.

В итоге судоводителям, осуществляющим вход и плавание в бухте Лох-Брум, предлагается выполнять следующие рекомендации:

– в первую очередь следует знать и принимать во внимание возможность оптических иллюзий, следствием которых является неправильная визуальная оценка расстояния до берега и размеров бухты Лох-Брум;

– кроме лоцманского (визуального) метода судовождения, основанного на зрительной оценке пространства (акватории), необходимо активно применять штурманский метод, контролируя место судна посредством надежных обсерваций с использованием морских навигационных карт;

– по возможности осуществлять заход в бухту в такое время и при таких гидрометеословиях, которые обеспечивают отсутствие отражения и возможности наблюдать контуры прибрежных холмов;

– в любых условиях захода в бухту необходимо вести постоянное радиолокационное наблюдение и измерять при помощи РЛС фактическое расстояние до берега.

Заключение (Conclusion)

Традиционное описание районов плавания, как правило, основано на результатах анализа объективных условий и обстоятельств плавания, а также их динамики (при наличии последней). В соответствии с идентичными принципами формулируются и рекомендации судоводителям. Однако в процессе несения вахты судоводитель оценивает навигационную ситуацию и, в частности, размеры акватории плавания не как объективную реальность, а как образ, формирующийся в сознании на основе субъективного восприятия. Очевидно, что идеальным вариантом для принятия грамотного и адекватного ситуации решения является совпадение представления судоводителя об условиях и обстоятельствах плавания с действительной навигационной ситуацией. Вместе с тем подобный вариант является насколько идеальным, настолько и недостижимым — при визуальном восприятии и обработке предоставляемой средой информации в сознании человека всегда формируется исключительно субъективная картина.

Другой вопрос заключается в том, насколько значимым является расхождение между объективной реальностью и ее субъективной оценкой судоводителем для навигационной безопасности плавания и может ли субъективизм оценки повлиять на адекватность решения по управлению судном. Как правило, решение ВПК, основанное на субъективной оценке навигационной ситуации, будет таким же, как и при оценке объективной. Однако существует и ряд исключений, которые могут инициировать решения ВПК, не соответствующие обстоятельствам и условиям плавания, и, как следствие, привести к навигационной аварии. Подобная ситуация вполне вероятна в бухте Лох-Брум, расположенной на западном побережье Шотландии. В процессе проведенного исследования было установлено, что особенности зрительного аппарата человека и визуального восприятия им пространства в совокупности с конфигурацией бухты и рельефом ее побережья являются причиной одновременно и оптического, и психологического эффекта, который заключается в восприятии судоводителем размеров бухты Лох-Брум меньшими, чем это есть на самом деле. Наличие данного эффекта подтверждается судоводителями, имеющими опыт навигации на указанной акватории.

Естественно, что речь идет не о «подмене» в сознании судоводителя открытого моря узким каналом, что является галлюцинациями, психическим патологиями и противопоказанием к профессиональной деятельности, а о значительно меньших расхождениях реальности и ее восприятия. Однако описанный эффект, являющейся *оптической иллюзией*, может стать причиной неоправданно повышенной тревожности ВПК, а судоводителя с недостаточным уровнем психологической устойчивости привести к неадекватному решению, которое в итоге может оказать негативное влияние на навигационную безопасность плавания судна. Для предупреждения подобных последствий рассмотренного оптического эффекта предлагается принять к сведению обоснованные в статье рекомендации по заходу и навигации судов в бухте Лох-Брум, связанные, в первую очередь, с рационализацией использования в этой акватории методов и средств

судовождения. Следование этим рекомендациям минимизирует проявление оптических эффектов и исключит неправильный вывод о размерах акватории.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Ермаков С. В.* Формализация и содержание понятия «навигационная ситуация» / С. В. Ермаков // Эксплуатация морского транспорта. — 2012. — № 4 (70). — С. 17–21.
2. *Ермаков С. В.* Экспертное оценивание как основа построения метода формализованной оценки сложности навигационной ситуации / С. В. Ермаков // Журнал Университета водных коммуникаций. — 2013. — № 2. — С. 122–128.
3. *Григорьев Н. Н.* Факторы, влияющие на восприятие информации судоводителем / Н. Н. Григорьев, В. И. Сигида, А. П. Двинин // Морское образование: традиции, реалии и перспективы: материалы науч.-практ. конф. — СПб.: Изд-во ГУМРФ им. адм. С. О. Макарова, 2015. — С. 67–74.
4. *Григорьев Н. Н.* Восприятие информации как фактор безопасности мореплавания / Н. Н. Григорьев, А. П. Двинин, М. М. Наконечный // Морской флот. — 2015. — № 4. — С. 36–40.
5. Admiralty Sailing Directions NP66 West Coast Of Scotland Pilot. — 17th Edition. — 2012.
6. Лоция западного берега острова Великобритания. Ч. 2. Адм. № 1220: От мыса Малл-оф-Галлоуэй до мыса Рат и Гебридские острова. Вып. 2: От мыса Арднамурхан до мыса Рат. Северная группа Внутренних Гебридских островов и Внешние Гебридские острова. — СПб.: ГУНиО МО РФ, 2000. — 461 с.
7. Sailing Directions (Enroute). Scotland (Pub. 141). — Fifteenth Edition. — US National Geospatial-Intelligence Agency, 2015.
8. *Клементьев А. Н.* Обеспечение безопасности плавания современных судов смешанного плавания в стеснённых условиях / А. Н. Клементьев, М. Ю. Чурин // Вестник Волжской государственной академии водного транспорта. — 2015. — № 43. — С. 281–286.
9. *Богомья В. И.* Анализ некоторых эксплуатационных свойств современных крупнотоннажных судов, методов и систем их обеспечения при плавании в стеснённых условиях / В. И. Богомья, В. С. Давыдов, Р. В. Кожухаренко // Водный транспорт. — 2014. — № 3 (21). — С. 23–31.
10. *Сердитова К. А.* Психофизиологические закономерности организации зрительного восприятия / К. А. Сердитова // Студенческая наука и XXI век. — 2015. — № 12. — С. 102–104.
11. Визуальное восприятие информации и память [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <http://voolf.ru/bagagnik/31-bagagnic/32-vizualnie-voSPIriatie.html> (дата обращения: 08.07.2018).
12. *Ветвицкая С. М.* Иллюзии в жизнедеятельности человека / С. М. Ветвицкая, В. В. Лагунов // Международный студенческий научный вестник. — 2017. — № 6. — С. 118.
13. *Karpinskaia V.* The differences of sensory and motor evaluations of the Müller-Lyer and Ponzo illusions / V. Karpinskaia, V. Lyakhovetskii, N. Romanova-Afrikantova // Петербургский психологический журнал. — 2017. — № 19. — С. 133–151.
14. Восприятие пространства [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <http://psyznaiyka.net/view-voSPIriatie.html?id=voSPIriatie-prostranstva> (дата обращения: 08.07.2018).
15. *Ермаков С. В.* Психологическая устойчивость судоводителя как основная детерминанта влияния человеческого фактора на навигационную безопасность судна / С. В. Ермаков // Безопасность жизнедеятельности. — 2013. — № 5. — С. 14–19.

REFERENCES

1. Ermakov, S. V. "Formalization and the content of term "navigational situation." *Jekspluatacija morskogo transporta* 4(70) (2012): 17–21.
2. Ermakov, S. V. "Expert evaluation as the basis of building method of formalized assessment of complexity of navigational situation." *Zhurnal Universiteta vodnyh kommunikacij* 2 (2013): 122–128.
3. Grigor'ev, N. N., V. I. Sigida, and A. P. Dvinin. "Faktory, vliyayushchie na vospriyatie informatsii sudovoditelem." *Morskoe obrazovanie: traditsii, realii i perspektivy: materialy nauchno-prakticheskoi konferentsii*. SPb.: Izd-vo GUMRF im. adm. S. O. Makarova, 2015. 67–74.
4. Grigor'ev, N. N., A. P. Dvinin, and M. M. Nakonechnyj. "Vospriyatie informatsii kak faktor bezopasnosti moreplavaniya." *Morskoy flot* 4 (2015): 36–40.

5. *Admiralty Sailing Directions NP66 West Coast Of Scotland Pilot*. 17th Edition. 2012.
6. *Lotsiya zapadnogo berega ostrova Velikobritaniya. Chast' 2. Adm. №1220. Ot mysy Mall-of-Gallowey do mysy Rat i Gebridskie ostrova. Vypusk 2. Ot mysy Ardnamurkhan do mysy Rat. Severnaya gruppa Vnutrennikh Gebridskikh ostrovov i Vneshnie Gebridskie ostrova*. SPb.: GUNiO MO RF, 2000.
7. *Sailing Directions (Enroute). Scotland (Pub. 141)*. Fifteenth Edition. US National Geospatial-Intelligence Agency, 2015.
8. Klementyev, A. N., and M. U. Churin. "Ensuring of navigation's safety of «sea-river» going ships in congested water conditions." *Vestnik Volzhskoj akademii vodnogo transporta* 43 (2015): 281–286.
9. Bohomya, V., V. Davydov, and R. Kozhuharenko. "Analysis system properties of large vessels in critical conditions." *Vodnyj transport* 3(21) (2014): 23–31.
10. Serditova, K. A. "Psihofiziologicheskie zakonomernosti organizacii zritel'nogo vospriyatiya." *Studencheskaya nauka i XXI vek* 12 (2015): 102–104.
11. Vizual'noe vospriyatie informatsii i pamyat'. Web. 8 July 2018 <<http://voolf.ru/bagagnik/31-bagagnic/32-vizualnie-voSPIRYATIE.html>>.
12. Vetvitskaya, S. M., and V. V. Lagunov. "Illusions in the life of man." *Mezhdunarodnyj studencheskij nauchnyj vestnik* 6 (2017): 118.
13. Karpinskaia, Valeriia, Vsevolod Lyakhovetskii, and Nataliia Romanova-Afrikantova. "The Differences of Sensory and Motor Evaluations of the Müller-Lyer and Ponzo Illusions." *Peterburgskii psikhologicheskii zhurnal* 19 (2017): 133–151.
14. Vospriyatie prostranstva. Web. 8 July 2018 <<http://azps.ru/hrest/28/7752704.html>>.
15. Ermakov, S. V. "Psychological Stability of Navigator, as the Primary Determinant of Human Factor Influence on the Navigational Safety of the Vessel." *Life safety* 5 (2013): 14–19.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

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

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

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

*Статья поступила в редакцию 23 июля 2018 г.
Received: July 23, 2018.*

HUMAN FACTOR OF NAVIGATION IN THE ASPECT OF CYBERNETIC APPROACH

S. G. Fadyushin

Far Eastern Federal University, Vladivostok, Russian Federation

The article presents the results of a study on the topic of the human factor in navigation, which is topical for navigation. The relevance of the topic lies in the fact that the human factor as shown by accident statistics in the fleet has a predominant effect on the safety of navigation. However, despite the recognition by the world marine community of the human factor as one of the main and positive dynamics of the growth of research on this topic, the human factor problem remains unresolved. According to the established tradition, the main approach to studying the phenomenon of the human factor is the psychological approach in the interpretation of the science of navigation and the factor itself is considered psychological. In this article, based on the activity approach in psychology, a cybernetic approach to the study of the human factor in navigation is proposed and justified. The object of the study is a complex dynamic control system, the main elements of which are the boatmaster, ship and object of maneuver. The subject of the study is the human factor of navigation in Poisson's notation, as the main determinant of the probabilistic state of this system. The aim of the study is to develop a probabilistic model for the normalization of the human factor of navigation from the standpoint of the cybernetic approach. The task of the study is to justify the methodology of probabilistic estimation of the human factor of navigation. The research hypothesis is based on the basic principle of the activity approach in psychology, which consists in the unity of consciousness and human activity. If consciousness is still a poorly researched area in comparison with activity and practically does not lend itself to formalization, then by examining activity, through it one can come nearer to understanding the laws of natural human behavior and the human factor. The obtained results are recommended to specialists in the field of automation of ship movement control, creation of intelligent control systems and as scientific knowledge to navigators of merchant marine and fishing fleets.

Keywords: navigation, navigator, human factor in navigation, activity approach in psychology, cybernetics, safety of navigation, ship control, entropy, proportional navigation, Poisson's law.

For citation:

Fadyushin, Sergey G. "Human factor of navigation in the aspect of cybernetic approach." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova* 10.5 (2018): 922–935. DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-5-922-935.

УДК 656.61.052

ЧЕЛОВЕЧЕСКИЙ ФАКТОР СУДОВОЖДЕНИЯ В АСПЕКТЕ КИБЕРНЕТИЧЕСКОГО ПОДХОДА

С. Г. Фадюшин

Дальневосточный федеральный университет, Владивосток, Российская Федерация

В статье излагаются результаты исследования по актуальной для мореплавания теме человеческого фактора в судовождении. Актуальность темы заключается в том, что человеческий фактор, как показывает статистика аварийности на флоте, оказывает преобладающее влияние на безопасность мореплавания. Но несмотря на признание мировым морским сообществом человеческого фактора как одного из основных и положительную динамику роста исследований по этой теме, проблема человеческого фактора пока остается нерешенной. По сложившейся традиции основным подходом к изучению феномена человеческого фактора является психологический подход в интерпретации наук о судовождении, и сам фактор считается психологическим. В данной статье на основе деятельностного подхода в психологии предлагается и обосновывается кибернетический подход к изучению человеческого фактора в судовождении. Объектом исследования является сложная динамическая система управления, основными элементами которой являются судоводитель, судно и объект маневра, а предметом исследования — человеческий фактор судовождения в нотации Пуассона как основная детерминанта вероятностного состо-

яния системы управления. Цель исследования заключается в разработке вероятностной модели нормирования человеческого фактора судовождения с позиций кибернетического подхода. Задачей исследования служит обоснование методики вероятностной оценки человеческого фактора судовождения. Гипотеза исследования основана на принципе деятельностного подхода в психологии, который заключается в единстве сознания и деятельности человека. Если сознание пока представляет собой малоизученную область по сравнению с деятельностью и практически не поддается формализации, то посредством исследования деятельности можно приблизиться к пониманию законов естественного поведения человека и человеческого фактору. В результате проведенного исследования сформулировано понятие человеческого фактора в аспекте кибернетического подхода и предложен оценочный критерий вероятностного состояния системы управления. Полученные результаты рекомендуются для специалистов в области автоматизации управления движением судна, создания интеллектуальных систем управления и в качестве научных знаний судоводителям морских судов торгового и рыбопромыслового флота.

Ключевые слова: судовождение, судоводитель, человеческий фактор в судовождении, безопасность судовождения, управление судном, деятельностный подход в психологии, кибернетика, энтропия, пропорциональная навигация, закон Пуассона.

Для цитирования:

Фадюшин С. Г. Человеческий фактор судовождения в аспекте кибернетического подхода / С. Г. Фадюшин // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2018. — Т. 10. — № 5. — С. 922–935. DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-5-922-935.

Введение (Introduction)

В современной науке и практике управления подвижными объектами широко используется термин «человеческий фактор», который часто называют главной причиной аварийности на разных видах транспорта. По среднестатистическим данным, на долю этого фактора приходится в среднем 70–80 % аварий [1]–[4]. Аналогичная статистика существует и на водном транспорте, где эта цифра, по сведениям некоторых источников, достигает 90 % [5], [6].

Термин «человеческий фактор» обычно трактуется в психологическом аспекте. В психологии под ним подразумеваются «интегральные характеристики связи человека и технического устройства, проявляемые в конкретных условиях их взаимодействия в рамках так называемой системы человек-машина» [7, с. 546]. Совершенствование одного из звеньев этой системы — «машины» (судна) и недостаточное внимание к другому звену — «человеку» (судоводителю) привело к ситуации конца 80-х гг. XX в. — резкому росту аварийности, причины которого пока до конца не изучены. Парадокс заключался в том, что на фоне внедрения на морских судах высокотехнологичных систем управления, приборов и средств автоматизации аварийность не снизилась, а, наоборот, повысилась. Следует также отметить, что аналогичная ситуация наблюдалась и ранее при внедрении радиолокационных систем (РЛС). Таким образом, ряд серьёзных морских аварий и катастроф, которые произошли в конце прошлого столетия и были явно вызваны человеческими ошибками и недостатками управления, заставил международное морское сообщество переосмыслить систему безопасности мореплавания и по-новому взглянуть на проблему человеческого фактора.

В 1997 г. Международной морской организацией (ИМО) была принята Резолюция А.850(20). Концепция человеческого элемента, принципы и цели организации (ИМО). В пп. (а) приложения к этому документу дана следующая формулировка человеческого фактора (элемента): «человеческий элемент — комплексный, многогранный вопрос, затрагивающий безопасность на море и защиту морской окружающей среды. Он затрагивает весь спектр человеческой деятельности, выполняемой судовыми экипажами; береговыми службами управления; органами, издающими нормативные документы; классификационными обществами; судостроительными заводами; законодательными органами и другими соответствующими сторонами, и они нуждаются в сотрудничестве для того, чтобы эффективно решать вопросы человеческого элемента».

Резолюция ИМО явилась мощным стимулом к исследованию человеческого фактора во всех областях морехозяйственной деятельности. Обычно человеческий фактор рассматривается в психологическом аспекте как фактор, определяющий способности судоводителя по приему и обра-

ботке навигационной информации. Изучаются возможности судоводителя на основе поступившей информации принимать адекватные сложившимся условиям плавания решения, направленные на обеспечение безопасности, коммерческой эксплуатации судна и охраны окружающей среды. Исследуются способности судоводителя действовать в экстремальных навигационных ситуациях и сложных условиях плавания, таких как, например, описанные в работе [8]. При этом прослеживается формирование стереотипа человеческого фактора как психологической составляющей. Например, в работе [9] определяется роль человеческого фактора как психологической составляющей в обеспечении безопасности и профессиональной надежности в экстремальных, сложных условиях чрезвычайной ситуации. В работе [10] представлен обзор двадцати исследований человеческого фактора в следующих областях: усталость, стресс, здоровье, осведомленность о ситуации, совместная работа, принятие решений, связь, автоматизация и культура безопасности.

Такой (психологический) подход вполне оправдан и необходим при исследовании человеческого фактора в аспекте управления судном для обеспечения безопасности экипажа, пассажиров, груза и охраны окружающей среды. Однако при этом часто не принимается во внимание тот факт, что «система управления подвижным объектом (кораблем, судном, самолетом) является человеко-машинной и состоит из регулятора, в состав которого входит и оператор (вахтенный судоводитель, пилот), и объект регулирования, которым является подвижной объект как инженерное сооружение» [11, с. 1]. Возможно, именно в том, что при внедрении на морских судах средств автоматизации судоводитель как регулятор человеко-машинной системы утратил свои привычные функции и не успел адаптироваться к новой системе управления, заключается основная причина аварийности конца 80-х гг. XX в.

В настоящее время данный факт учитывается при внедрении на морских судах электронных средств для скоординированного сбора, интеграции, передачи, воспроизведения и анализа информации о ситуации на море, на борту судов и на берегу. В рамках проекта e-Navigation ИМО продиктована необходимость учета человеческого элемента (фактора) и в этом направлении проводятся научные исследования [12]. Тем не менее, учитывая стремительное развитие новых информационных технологий и их активное внедрение на морских судах, не исключено повторение негативной ситуации конца 80-х гг. XX в. Высокотехнологичные информационные системы морских судов привели к информационной избыточности вахтенного помощника капитана, которая достигла таких размеров, что является одной из проблем современного судоходства, как отмечается в работе [13]. Кроме того, нормативная рабочая нагрузка на экипаж, в соответствии с МКУБ, ПДМНВ, СОЛАС, МАРПОЛ и требованиями Кодекса ОСПС, усиливает стрессовое давление на судоводителя и негативным образом может сказаться на человеческом факторе судоходства, на что указывается в работе [14].

Включение судоводителя в звено управления судном как регулятора или элемента технического регулятора вносит ряд существенных проблем, так как при этом необходимо одновременно учитывать и психофизиологическое состояние судоводителя, и его личностные характеристики, и характеристики управляемости судна как объекта управления. Но если характеристики управляемости в основном формализованы и учитываются техническим регулятором, то все решения по управлению движением судна, которые принимает судоводитель, носят субъективный характер и, следовательно, трудно поддаются формализации. При этом правила, которыми должен руководствоваться судоводитель при принятии решений, должны опираться на естественные законы поведения человека в условиях морской среды. Однако проблема заключается в том, что пока нет достаточных знаний об этих законах и причинно-следственных связях взаимодействия человека и машины. Одним из путей решения этой проблемы может быть нормирование (количественная оценка) человеческого фактора [11], [15], [16]. Например, в работе [11, с. 2] отмечается следующее: «... большой интерес может представить попытка нормирования человеческого фактора, т. е. количественная оценка степени нашей уверенности в том, что его влияние на безопасность судна будет сведено к минимуму». Для решения этой задачи нужно последовательно ответить на следующие вопросы:

- можно ли количественно учитывать отрицательное влияние человеческого фактора;
- можно ли прогнозировать степень влияния человеческого фактора;
- можно ли осуществлять нормирование человеческого фактора.

В этом научном направлении уже проводятся исследования. В качестве примера можно привести работу [15], в которой дано обоснование метода количественной оценки влияния человеческого фактора на навигационную безопасность плавания судна, который положен в основу превентивного регулирования человеческого фактора в процессе судовождения. По сути, предлагается новая методология (модель), которая «...позволяет отказаться от преобладающего в настоящее время в системах оценки качества систем управления безопасностью бинарного подхода и перейти к количественной оценке, используя бальную систему и различные уровни зрелости этих систем» [11, с. 2].

Несмотря на прогресс в решении проблемы человеческого фактора в судовождении, тем не менее следует отметить, что эта проблема пока еще далека от своего окончательного решения. Недаром в руководящих документах и конвенциях ИМО говорится о том, что человеческий элемент представляет собой сложную многомерную проблему, которая охватывает весь спектр человеческой деятельности на море. Тот же самый контекст выделен в работе [11] при изложении необходимости нормирования человеческого фактора, которое также является сложнейшей задачей управления подвижным объектом. Особенно это актуально для такого сложного технического объекта, каким является морское судно.

Выполненное в статье исследование человеческого фактора судовождения проведено в аспекте кибернетического подхода, основанного на деятельностном подходе в психологии. Возможно, именно кибернетика как наука об искусстве управления поможет найти ответ на вопрос о том, что такое человеческий фактор и какова его роль при управлении движением морского судна.

Цель исследования заключается в разработке вероятностной модели нормирования человеческого фактора судовождения с позиций кибернетического подхода.

Задачей исследования является обоснование методики вероятностной оценки человеческого фактора судовождения. В основе гипотезы исследования лежит принцип деятельностного подхода в психологии, который заключается в единстве сознания и деятельности человека. Сознание, формирующее человеческий фактор, пока представляет собой малоизученную область по сравнению с деятельностью и практически не поддается формализации. Деятельность человека, напротив, доступна для исследования и формализации. Отсюда следует, что посредством изучения деятельности можно приблизиться к пониманию законов естественного поведения человека и, соответственно, понять суть и роль человеческого фактора, в том числе и в судовождении.

Методы и материалы (Methods and Materials)

Управление движением судна с точки зрения судоводителя можно интерпретировать как целенаправленную деятельность, направленную на достижение определенной цели (переход из точки отхода в точку прихода, расхождение с другим судном, маневрирование относительно подвижного объекта, наведение судна на косяк рыб и др.) с учетом условий среды. Для исследования человеческого фактора, прежде всего, проведем макроструктурный анализ этой деятельности в аспекте деятельностного подхода в психологии.

«Деятельностный подход в психологии — это совокупность теоретико-методологических и конкретно-эмпирических исследований, в которых психика и сознание, их развитие и формирование изучаются в различных формах предметной деятельности субъекта, а у некоторых представителей деятельностного подхода рассматриваются как особые формы (виды) этой деятельности, производные от внешне-практических ее форм» [17]. В рамках этого подхода макроструктура человеческой деятельности по А. Н. Леонтьеву [18] состоит из трех «единиц»: деятельность – действие – операция. Деятельность определяется мотивом, действие — целью, операция — конкретными условиями ее протекания: «...в общем потоке деятельности, который образует человеческую жизнь в ее высших, опосредствованных психическим отражением проявлениях, анализ выделяет,

во-первых, отдельные (особенные) деятельности — по критерию побуждающих их мотивов. Далее выделяются действия — процессы, подчиняющиеся сознательным целям. Наконец, операции, которые непосредственно зависят от условий достижения конкретной цели» [18, с. 157].

Структурные «единицы» в контексте рассматриваемой деятельности означают следующее: деятельность — управление движением судна (судовождение), действие — деятельностный акт, состоящий из спектра задач, решаемых судоводителем на ходовой вахте (расхождение с судном, сближение с косяком рыб и др.), операция — конкретное выполняемое действие в зависимости от условий плавания (изменение курса или скорости судна). Соответственно мотивом будет профессиональный долг судоводителя согласно Уставу и другим руководящим документам. Действия должны соответствовать правилам плавания и ведения промысла, операции зависят от знаний и практического опыта, полученного в конкретных условиях плавания. Теоретико-типологический анализ подборки литературы по теме человеческого фактора в судовождении показывает, что именно такой деятельностный подход в психологии, как правило, лежит в основе исследований по данной теме.

В работе А. Н. Леонтьева [18, с. 157] подчеркивается, что «... анализ выделяет, во-первых, отдельные (особенные) деятельности — по критерию побуждающих их мотивов». Выделение таких отдельных (особенных) деятельностей в теории деятельностного подхода тождественно сопоставимо с термином «опредмечивание» деятельности. Применительно к теме данного исследования рассмотрим «опредмечивание» на следующем примере. Судну, ведущему лов в районе промысла, необходимо сблизиться с подвижным косяком рыб. Сближение осуществляется по траектории, координаты и параметры которой предварительно рассчитаны по известным в промысловом судовождении методам, с которыми можно ознакомиться в работах [19]–[21]. К их числу относятся:

1. Методы с фиксированным направлением вектора скорости судна относительно линии пеленга с судна на объект маневра следующие: метод погони, метод постоянного угла упреждения.
2. Методы с изменяющимся направлением вектора скорости судна относительно линии пеленга с судна на объект маневра: метод параллельного сближения и метод пропорционального сближения.

Обобщением этих методов является метод пропорциональной навигации, изложенный в работе [22]. Закон пропорциональной навигации связывает угловую скорость поворота линии пеленга с угловой скоростью поворота вектора скорости судна через коэффициент пропорциональности, который называется *навигационной постоянной*. При реализации этого метода необходимо постоянно измерять угловую скорость поворота линии пеленга на объект маневра и сравнивать ее с угловой скоростью поворота вектора скорости судна.

Предположим, что при сближении судна с косяком рыб угол дрейфа равен нулю, т. е. вектор скорости судна направлен вдоль диаметральной плоскости. Тогда уравнение метода пропорциональной навигации будет иметь следующий вид:

$$\dot{K}_c = b\dot{I}, \quad (1)$$

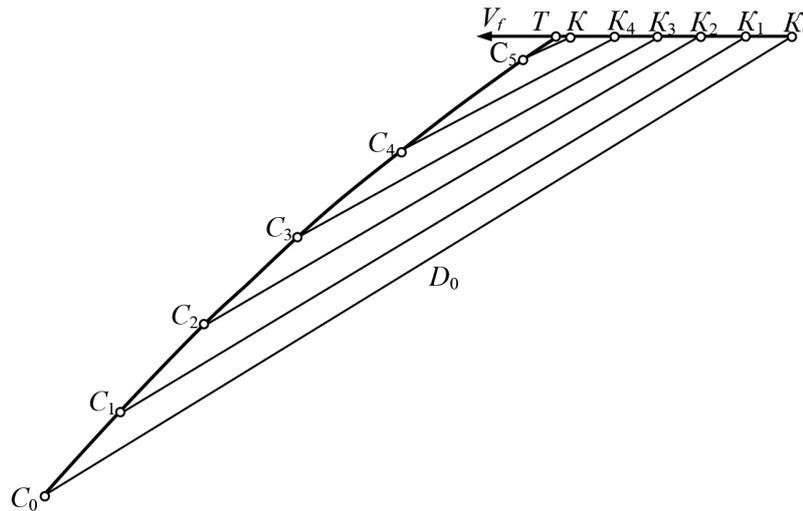
где \dot{K}_c — скорость изменения курса судна; \dot{I} — скорость изменения пеленга на объект маневра; b — коэффициент пропорциональности (навигационная постоянная).

При сближении ошибка наведения представляет собой разность между вычисленным значением угловой скорости линии пеленга на объект маневра и текущей скоростью поворота вектора скорости судна:

$$\Delta = b\dot{I} - \dot{K}_c. \quad (2)$$

В аспекте деятельностного подхода в этом примере «опредмеченная» деятельность — пропорциональная навигация, мотив — закон пропорциональной навигации (1), действие — измерение угловой скорости линии пеленга на объект маневра и сравнение ее с угловой скоростью поворота вектора скорости судна, цель — нивелирование ошибки наведения (2), операция — следование заданными курсом и скоростью и изменение угла перекладки руля при появлении ошибки наведения.

Судоводитель как регулятор управления не в состоянии реализовать закон (1). Для этого ему бы понадобилось в каждый момент времени измерять угловую скорость линии пеленга на объект маневра и сравнивать ее с угловой скоростью поворота вектора скорости судна, что практически для человека неосуществимо. Поэтому при наведении судна на подвижный объект (косяк) при заданном векторе его движения V_f по дистанции D и пеленгу рассчитываются координаты промежуточных точек траектории движения относительно точек местоположения объекта маневра K_0, K_1, \dots, K_n . При таком способе сближение осуществляется по промежуточным точкам C_0, C_1, \dots, C_m на прямых курсах до точки встречи (показано на рисунке).



Кинематическая траектория судна при сближении с объектом маневра методом пропорциональной навигации

При сближении по промежуточным точкам «опредмеченная» деятельность, мотив и цель остаются прежними, действие представляет собой расчет промежуточных точек и построение траектории движения, операция — принятие решения в каждой промежуточной точке об изменении курса или перерасчете траектории сближения. Таким образом, в процессе «опредмечивания» методология исследования человеческого фактора из сферы психологии управления перешла в сферу кибернетики. Поэтому логично такой подход к теме исследования назвать *кибернетическим*. При этом основной принцип деятельностного подхода остался неизменным, так как судоводитель по-прежнему является регулятором системы управления. Следовательно, в макроструктуре «опредмеченной» деятельности человеческий фактор будет содержаться в одной из ее «единиц», а именно в операции.

Операция — это принятие решения в промежуточной точке траектории. Поэтому промежуточные точки имеют двойственное значение: с одной стороны, это детерминированные точки кинематической траектории движения, с другой — точки, в которых судоводитель принимает решения по управлению движением судна. Т. е. это точки, частота которых зависит от множества случайных причин, включая человеческий фактор. При этом закономерно возникает вопрос, как из множества причин, оказывающих влияние на принятие решений по управлению движением судна, выделить именно субъективные. Ответ на этот вопрос заключается в стохастическом анализе промежуточных точек и прежде всего в выборе случайной величины X и закона ее распределения.

Случайное распределение точек в поле траектории движения, как следует из характеристики исследуемого процесса, должно удовлетворять следующим условиям:

1. Точки распределяются статистически равномерно со средней плотностью λ (математическое ожидание числа точек, приходящихся на единицу длины).
2. Точки распределяются независимо друг от друга.

3. Вероятность попадания на малый участок двух или более точек пренебрежимо мала по сравнению с вероятностью попадания одной точки, т. е. точки появляются поодиночке.

Обозначим траекторию движения как отрезок AB длины l и рассмотрим дискретную случайную величину X — число точек, попадающих на этот отрезок. Возможными значениями случайной величины будут:

$$0, 1, 2, \dots, m, \dots \quad (3)$$

Так как точки попадают на отрезок независимо друг от друга, теоретически не исключено, что их окажется сколь угодно много, т. е. ряд (3) продолжается неограниченно. Тогда вероятность попадания отдельной точки на отрезок AB будет низка, и вероятности точек будут равны. При заданных условиях низкой и равной вероятности событий появление каких-либо примечательных событий, таких, например, как выход судна в расчетную точку, можно с определенной вероятностью соотнести с влиянием человеческого фактора: судоводитель в условиях неопределенности среды стремится привести судно в заданную точку. В теории вероятностей заданным условиям соответствует закон распределения случайной величины, называемый *законом Пуассона*.

Примечательно, что этот закон получен и использовался С. Д. Пуассоном для исследования вероятности приговоров в уголовных и гражданских делах. Так, в книге «Исследование о вероятности приговоров в уголовных и гражданских делах» ученый дает следующее обоснование этого закона: «Когда возможно очень большое число событий, априорно имеющих равные и очень низкие вероятности, появление одного из тех, которые представляют что-либо примечательное, следует весьма вероятно приписать особой причине C , аналогичной, к примеру, человеческой воле, а не случаю» [23, с. 11]. В этом высказывании выражение «человеческая воля» можно истолковать и как «человеческий фактор». Отсюда следует, что в нотации Пуассона человеческий фактор является особой причиной появления случайных примечательных событий, имеющих равную и низкую вероятность субъективной природы. Таким образом, в качестве случайной величины X можно принять количество промежуточных точек (точек принятия решений) на траектории движения, распределенных по закону Пуассона. Строгое математическое доказательство того, что распределение X на прямой AB подчиняется данному закону, приведено в источнике [24]. Там же приведены основные формулы, которые будут использоваться в дальнейших расчетах при формировании методики вероятностного нормирования человеческого фактора.

По закону Пуассона, вероятность того, что величина X примет определенное значение m , выражается формулой

$$P_m = \frac{a^m}{m!} e^{-a} \quad (m = 0, 1, \dots),$$

где a — некоторая положительная величина, называемая *параметром закона Пуассона*. Величина a по смыслу представляет собой среднее число точек, приходящихся на отрезок l .

Вероятность того, что величина X примет положительное значение, т. е. вероятность того, что на отрезок l попадет хотя бы одна точка, определяется в виде

$$R_1 = 1 - e^{-a}. \quad (4)$$

Вероятность того, что величина X примет значение не больше заданного k , можно определить по формуле

$$R_k = P_0 + P_1 + \dots + P_{k-1} = \sum_{m=0}^{k-1} P_m. \quad (5)$$

Вероятность того, что величина X примет значение не меньше заданного k , можно определить из вероятности противоположного события:

$$R_k = 1 - (P_0 + P_1 + \dots + P_{k-1}) = 1 - \sum_{m=0}^{k-1} P_m. \quad (6)$$

С учетом того, что промежуточные точки имеют значение точек принятия решений и при условии их случайного распределения на траектории движения по закону Пуассона сформулируем и опишем алгоритм решения следующей задачи управления движением судна: дана сложная динамическая система: «судоводитель – судно – объект маневра», основными элементами которой являются: судоводитель – субъект маневрирования, судно – объект маневрирования, объект маневра – подвижный или неподвижный объект, относительно которого судно совершает маневрирование. Судно, управляемое судоводителем, должно сблизиться с объектом маневра на заданное расстояние или вплотную. Траектория движения и ее параметры судоводителю известны.

Требуется:

1. Рассчитать количество промежуточных точек траектории для случая максимальной неопределенности и наилучшего случая при их планировании (нормировании) по критерию заданной вероятности.
2. Оценить вероятностное состояние системы по количеству планируемых промежуточных точек траектории.
3. Оценить вероятностное состояние системы при сближении судна с объектом маневра в текущих промежуточных точках траектории.

Решение

1. *Расчёт количества промежуточных точек траектории для случая максимальной неопределенности и наилучшего случая при их планировании по критерию заданной вероятности.*

Возможные состояния рассматриваемой системы (X_a) по количеству планируемых промежуточных точек траектории за время сближения (частота принятия решений судоводителем) будут:

x_1 — количество промежуточных точек примет значение не больше заданного k ;

x_2 — количество промежуточных точек примет значение не меньше заданного k .

При этом получим следующие вероятности состояний:

$$x_1: R_{k1} = P_0 + P_1 + \dots + P_{k-1};$$

$$x_2: R_{k2} = 1 - (P_0 + P_1 + \dots + P_{k-1}).$$

Количество промежуточных точек на траектории движения достигнет своей максимальной неопределенности или (с учетом двойственного значения этих точек) наступит максимальная неопределенность принятия решений судоводителем при равновероятных состояниях x_1 и x_2 . Т. е. можно записать следующее равенство:

$$P_0 + P_1 + \dots + P_{k-1} = 1 - (P_0 + P_1 + \dots + P_{k-1}),$$

решая которое можно получить значение параметра закона Пуассона a . Полученное значение параметра a по определению есть математическое ожидание количества точек при распределении Пуассона или по смыслу — это среднее число точек, приходящихся на длину траектории.

В этом случае вероятность состояний x_1 и x_2 будет равна 0,5. Для получения более надежного результата зададимся «предельной» вероятностью состояния x_2 , которую примем на уровне 0,99. Тогда, решая равенство

$$R_{k2} = 1 - (P_0 + P_1 + \dots + P_{k-1}) = 0,99,$$

получим значение параметра a и, соответственно, среднее количество точек на траектории при заданной «предельной» вероятности.

2. *Оценка вероятностного состояния системы по количеству планируемых промежуточных точек траектории.*

Для перехода от вероятностей состояний системы к вероятности состояния системы в целом по количеству планируемых промежуточных точек траектории введем в рассмотрение широко используемый в теории информации обобщающий статистический показатель — энтропию. Так как события x_1 и x_2 независимы, то энтропию можно рассчитать по известной формуле К. Шеннона:

$$H(X) = - \sum_{i=1}^n p_i \log p_i, \quad (7)$$

где p_i — вероятности возможных состояний системы.

В случае равновероятных событий энтропия системы достигнет максимального значения и будет равна $H(X) = 1$. Максимальное значение энтропии показывает максимальную неопределенность состояния системы управления и может служить в качестве основного критерия (своеобразного «нуля» оценочной шкалы) оценки вероятностного состояния системы «судоводитель – судно – объект маневра».

3. *Оценка вероятностного состояния системы при сближении судна с объектом маневра в текущих промежуточных точках траектории.*

Возможные состояния системы X_a при сближении судна с объектом маневра в текущих промежуточных точках траектории будут:

x_1 — судно вышло в расчетную промежуточную точку;

x_2 — судно не вышло в расчетную промежуточную точку.

При этом получим следующие вероятности состояний:

$$x_1: P_1 = 1 - e^{-a};$$

$$x_2: P_2 = e^{-a}.$$

Определим максимальную неопределенность состояния системы X_a , которая появляется при равновероятных состояниях системы. Т. е. можно записать следующее равенство:

$$1 - e^{-a} = e^{-a}.$$

После преобразований получим

$$a = \frac{1}{\log_2 e} = 0,6931.$$

При этом значении параметра a энтропия системы достигнет максимального значения $H(X) = 1$.

Величина параметра a по смыслу представляет собой среднее число точек, приходящихся на отрезок l линии пеленга, проходящей через расчетную точку, судно и объект маневра, и рассчитывается по формуле

$$a = \lambda l.$$

Тогда можно рассчитать дистанцию от судна до объекта маневра, при которой неопределенность системы X_a достигнет максимального значения:

$$l = \frac{a}{\lambda},$$

где $\lambda = l_s^{-1}$; l_s — расчетная дистанция до объекта маневра.

Текущее значение параметра закона Пуассона можно рассчитать по формуле

$$a_i = \lambda l_i,$$

где l_i — текущая дистанция до объекта маневра.

Тогда с учетом уравнения плотности λ получим

$$a_i = \frac{l_i}{l_s}.$$

Текущее значение энтропии рассматриваемой системы с вероятностью состояний x_1 и x_2 можно рассчитать по формуле (7). При этом для x_1 вероятность состояния будет $p_1 = 1 - e^{-a_i}$, для x_2 — $p_2 = e^{-a_i}$.

Результаты (Results)

Для проверки валидности теоретических выкладок конкретной практической ситуации решим следующий пример: судно должно сблизиться с подвижным косяком рыб вплотную для его отлова. Предполагается, что сближение будет осуществляться методом пропорциональной навигации. Траектория сближения рассчитана и известны параметры сближения (см. рисунок с. 925). По расчетам в одной из контрольных промежуточных точек дистанция сближения должна быть равна 5 кбт. При выходе судна на линию расчетного значения пеленга фактическое значение дистанции оказалось равным 4 кбт.

Требуется:

1. Рассчитать количество промежуточных точек траектории для случая максимальной неопределенности и наилучшего случая при их планировании по критерию заданной вероятности.
2. Оценить вероятностное состояние системы по количеству планируемых промежуточных точек траектории.
3. Оценить вероятностное состояние системы при сближении судна с объектом маневра в контрольной промежуточной точке траектории.

Решение

1. Рассчитаем количество промежуточных точек траектории для случая максимальной неопределенности и наилучшего случая при их планировании по критерию заданной вероятности $R_x = 0,99$.

1.1. Рассчитаем количество промежуточных точек траектории (частоту принятия решений судоводителем) для случая максимальной неопределенности при заданном исходном количестве точек $m = 5$ (см. рисунок с. 925).

Составим равенство:

$$P_0 + P_1 + P_2 + P_3 + P_4 = 1 - (P_0 + P_1 + P_2 + P_3 + P_4),$$

из которого численными способами находим, что значение параметра закона Пуассона $a = 4,67$. Учитывая, что параметр a — среднее количество точек на траектории, сделаем вывод о том, что в наихудшем случае количество планируемых промежуточных точек траектории (частота принятия решений судоводителем) должно быть примерно равным заданному исходному количеству точек. Т. е. если при сближении исходное количество точек $m = 5$ и траектория разбита на пять точек (планируется, что будет принято пять решений), то это будет наихудший вариант решения поставленной задачи. При этом исходное количество точек m задается исходя из практических соображений в соответствии с условиями среды, правил плавания и ведения промысла.

1.2. Рассчитаем количество промежуточных точек траектории сближения для наилучшего случая при заданной вероятности $R_x = 0,99$. Составим равенство

$$1 - (P_0 + P_1 + P_2 + P_3 + P_4) = 0,99,$$

из которого найдем значение параметра закона Пуассона $a = 11,60$. Т. е. в наилучшем случае при заданном $m = 5$ траекторию движения необходимо разбить на 12 точек. Для успешного решения поставленной перед судоводителем задачи ему необходимо следовать плану, т. е. осуществлять движение по 12 точкам, тогда с вероятностью 0,99 будет обеспечен выход в не менее чем пяти заданных точках. С учетом двойственного значения точек — не менее пяти решений из 12 будут наилучшими по критерию заданной вероятности.

2. Выполним оценку вероятностного состояния системы по количеству планируемых промежуточных точек траектории.

Энтропия системы «судоводитель – судно – объект маневра» в случае максимальной неопределенности будет равна максимальному значению $H(X)_{\max} = 1$ бит.

В наилучшем случае при заданной вероятности $R_x = 0,99$ для расчета энтропии используем формулу (7):

$$H(X) = - \sum_{i=1}^n p_i \log p_i = -(0,01 \log 0,01 + 0,99 \log 0,99) = 0,08079 \text{ бит.}$$

3. Выполним оценку вероятностного состояния системы при сближении судна с объектом маневра в контрольной промежуточной точке траектории.

3.1. Рассчитаем дистанцию до объекта маневра, при которой энтропия системы «судоводитель – судно – объект маневра» достигнет максимального значения и будет равна

$$H(X)_{\max} = 1 \text{ при } \lambda = \frac{1}{5} \text{ точек / кбт и } a = 0,6931:$$

$$l_{\max} = \frac{a}{\lambda} = 0,6931 \cdot 5 = 3,5 \text{ кбт.}$$

2.2. Рассчитаем текущее значение параметра закона Пуассона при $\lambda = \frac{1}{5}$ точек / кбт и текущем значении дистанции до объекта маневра $l_i = 4$ кбт:

$$a_i = \lambda l_i = \frac{1}{5} \cdot 4 = 0,8.$$

2.3. Рассчитаем вероятность состояния x_1 :

$$p_1 = 1 - e^{-a_i} = 1 - e^{-0,8} = 0,5506.$$

2.4. Рассчитаем вероятность состояния x_2 :

$$p_2 = e^{-a_i} = e^{-0,8} = 0,4493.$$

2.5. Рассчитаем текущее значение энтропии системы «судоводитель – судно – объект маневра»:

$$H(X)_i = -\sum_{i=1}^n p_i \log p_i = -(0,5506 \cdot \log 0,5506 + 0,4493 \cdot \log 0,4493) = 0,9925 \text{ бит.}$$

Вывод. По результатам расчета получено: $l_i > l_{\max}$; $H(X)_i < H(X)_{\max}$. Следовательно, текущее состояние системы «судоводитель – судно – объект маневра» можно считать удовлетворительным, и судно может продолжать сближение с объектом маневра по запланированной траектории с учетом коррекции ошибки сближения.

Обсуждение (Discussion)

Таким образом, с учетом теоретических выкладок и результатов решения контрольного примера, можно сделать следующие выводы.

1. В нотации Пуассона человеческий фактор — особая детерминанта появления случайных примечательных событий, имеющих равную и низкую вероятность субъективной природы.

2. В интерпретации деятельностного подхода примечательное событие — результат целенаправленной деятельности судоводителя по управлению движением судна (например, выход судна в заданную промежуточную точку на траектории движения).

3. При оценке вероятностного состояния управляемой системы особая пуассоновская детерминанта может быть выражена количеством энтропии, приходящейся на одно принятое решение.

В аспекте кибернетического подхода человеческий фактор судоводения — это статистический параметр, который измеряет среднее количество энтропии вероятностного состояния системы «судоводитель – судно – объект маневра», приходящееся на одно принятое судоводителем решение. Человеческий фактор находится поверх детерминированного фактора, т. е. принятию решений судоводителем должна предшествовать строгая логическая проработка задачи управления в математическом виде.

Частота принятия решений судоводителем в процессе выполнения задачи управления должна превышать исходную заданную частоту, которая основана на опыте и задается исходя из практических соображений в соответствии с условиями среды, правил плавания и ведения промысла. Например, если при планировании задачи управления траекторию движения разбить на то же самое (одинаковое) количество точек, которое соответствует исходному заданному, то это будет наихуд-

ший вариант решения поставленной задачи. В данном случае энтропия системы управления будет максимальной. Для обеспечения наилучшего варианта развития событий в процессе решения поставленной задачи траекторию движения необходимо разбить на количество промежуточных точек, примерно в 2,5 раза (по данным контрольного примера) превышающее исходное заданное.

Данный вывод в интерпретации кибернетического подхода может претендовать на один из естественных законов поведения человека (судоводителя) при управлении сложной системой. На практике эта закономерность нашла отражение в одном из принципов судовождения, который формулируется как «*считай себя ближе к опасности*». Согласно этому принципу, опытный судоводитель стремится повысить частоту принятия решений при выполнении стоящей перед ним сложной задачи управления. Например, при подходе к узкости с точки зрения логики достаточно одной точной обсервации, чтобы судно вошло в нее. Тем не менее опытный судоводитель, как правило, выполняет несколько обсерваций. Для этого примера, согласно выполненным расчетам, необходимо сделать не менее пяти обсерваций при заданной «предельной» вероятности.

Заключение (Conclusion)

Основные результаты проведенного исследования заключаются в следующем:

- в нотации Пуассона сформулировано понятие человеческого фактора судовождения;
- в вероятностной трактовке показан один из возможных законов естественного поведения человека при управлении движением судна;
- предложен оценочный критерий вероятностного состояния системы управления «судоводитель – судно – объект маневра» в виде максимального значения энтропии системы управления при равенстве вероятностей ее возможных состояний.

Кибернетический подход к решению проблемы человеческого фактора в судовождении позволяет в качестве универсального оценочного параметра состояния системы управления «судоводитель – судно – объект маневра» использовать одно из основных понятий теории информации — энтропию. Нормирование энтропии как оценочного параметра позволяет в количественном виде нормировать человеческий фактор, а также учитывать и прогнозировать его влияние на систему управления.

Несмотря на полученные результаты, тем не менее, следует отметить, что проблема человеческого фактора в судовождении пока еще далека от своего окончательного решения. Продолжение исследований в рамках предлагаемого подхода является целесообразным в направлении решения актуального вопроса планирования задачи управления и ее реализации.

Полученные результаты рекомендуются для использования специалистами в области автоматизации управления движением судна, создания интеллектуальных систем управления и в качестве научных знаний для судоводителей морских судов торгового и рыбопромыслового флота.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Пазовский В. М. Аварийность на мировом флоте // Безопасность судоходства в Дальневосточном бассейне: сб. докл. науч.-практ. конф. 24–25 октября 2007 г. — Владивосток: Морской гос. ун-т, 2007. — С. 108–113.
2. Информационный бюллетень «INTERTANKO». Tanker incidents. — 2008. — 27 с.
3. Субанов Э. Э. Адаптация метода анализа иерархий для принятия решений при оценке степени опасности столкновения морских судов / Э. Э. Субанов, А. В. Миронов // Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Серия: Технические науки. — 2012. — № 3 (167). — С. 8–12.
4. Tzannatos E. Human element and accidents in greek shipping / E. Tzannatos // The Journal of Navigation. — 2010. — Vol. 63. — Is. 1. — Pp. 119–127. DOI: 10.1017/S0373463309990312.
5. Количество аварий на водном транспорте в 2015 году увеличилось на 62 %, большая часть приходится на рыбопромысловые суда [Электронный ресурс]. — Режим доступа: http://portnews.ru/top_news/216552/ (дата обращения: 28.08.2018).

6. Human Element. International Maritime Organization [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <http://www.imo.org/OurWork/HumanElement/Pages/Default.aspx> (дата обращения: 28.08.2018).
7. Копорулина В. Н. Психологический словарь / В. Н. Копорулина, М. Н. Смирнова, Н. О. Гордеева. — 3-е изд., доп. и перераб. — Ростов н/Д: Феникс, 2004. — 640 с.
8. Akten N. Analysis of shipping casualties in the Bosphorus / N. Akten // *The Journal of Navigation*. — 2004. — Vol. 57. — Is. 3. — Pp. 345–356. DOI: 10.1017/S0373463304002826.
9. Даниленко А. А. Профессиональная надёжность плавсостава как важнейшее условие безопасности судоходства / А. А. Даниленко, А. А. Даниленко // *Эксплуатация морского транспорта*. — 2008. — № 3 (53). — С. 30–35.
10. Hetherington C. Safety in shipping: The human element / C. Hetherington, R. Flin, K. Mearns // *Journal of safety research*. — 2006. — Vol. 37. — Is. 4. — Pp. 401–411. DOI: 10.1016/j.jsr.2006.04.007.
11. Сазонов А. Е. Человеческий фактор и безопасность управления подвижными объектами / А. Е. Сазонов // *Сб. материалов XVI Общего собрания академии навигации и управления движением*. — 2003. — С. 6–8.
12. Patraiko D. e-Navigation and the Human Element / D. Patraiko, P. Wake, A. Weintrit // *Marine Navigation and Safety of Sea Transportation*. — CRC Press, 2009. — Pp. 55–60. DOI: 10.1201/9780203869345.ch5
13. Маурер А. И. Информационная перегрузка как фактор аварийности / А. И. Маурер, О. А. Истомина // *Вестник Морского государственного университета*. — 2007. — № 15. — С. 60–69.
14. Loginovsky V. A. “The ISPS code as a component of onboard resources in Bayesian Analysis.” / V. A. Loginovsky, A. P. Gorobtsov, V. E. Kuzmin // *Maritime Security and MET: 6th General Assembly of IAMU, Malmö, Sweden 24.-26.10.2005*. — Southampton: WIT Press, 2005. — Pp. 215–224.
15. Ермаков С. В. Превентивное регулирование человеческого фактора в морском судождении / С. В. Ермаков // *Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова*. — 2016. — № 5(39). — С. 39–50. DOI: 10.21821/2309-5180-2016-8-5-39-50.
16. Коровин А. Г. Разработка методов влияния человеческого фактора на безопасность судна / А. Г. Коровин // *Вестник Камчатского государственного технического университета*. — 2009. — № 10. — С. 31–36.
17. Психологический словарь / Под ред. В. П. Зинченко, Б. Г. Мещерякова. — 2-е изд., перераб. и доп. — М.: Педагогика-Пресс, 1999. — 440 с.
18. Леонтьев А. Н. Избранные психологические произведения: в 2-х т. / А. Н. Леонтьев. — М.: Педагогика, 1983. — Т. II — 320 с.
19. Фадюшин С. Г. Сближение судна с подвижным объектом методом пропорциональной навигации / С. Г. Фадюшин // *Современные проблемы науки и образования*. — 2012. — № 4. — С. 121.
20. Фадюшин С. Г. Методы наведения судна на движущийся косяк рыбы / С. Г. Фадюшин // *Вестник Морского государственного университета*. — 2012. — № 25. — С. 90–95.
21. Fadyushin S. G. The Linear Assessment Model for Navigational Factors / S. G. Fadyushin // *World Applied Sciences Journal*. — 2014. — Vol. 29. — Is. 5. — Pp. 689–693. DOI: 10.5829/idosi.wasj.2014.29.05.13904.
22. Канн В. Л. Теория пропорциональной навигации / В. Л. Канн, А. С. Кельзон. — Л.: Судостроение, 1965. — 423 с.
23. Пуассон С. Д. Исследования о вероятности приговоров в уголовных и гражданских делах / С. Д. Пуассон; пер. О. Б. Шейнина. — Изд. 2-е испр. — Берлин: N. G. Verl. (Viatcheslav Demidov), 2013. — 328 с.
24. Вентцель Е. С. Теория вероятностей / Е. С. Вентцель. — 11-е изд., стер. — М.: КНОРУС, 2010. — 664 с.

REFERENCES

1. Pazovskiy, V. M. “Avariynost’ na mirovom flote.” *Bezopasnost’ sudokhodstva v Dal’nevostochnom bassejne: Sbornik dokladov nauchno-prakticheskoy konferentsii*. Vladivostok: Maritime State University Press, 2007. 108–113.
2. *Informatsionnyy byulleten’ «INTERTANKO». Tanker incidents*. 2008.
3. Subanov, E. E., and A. V. Mironov. “Hierarchy analysis adoption in taking decisions while evaluation of danger degree in sea vessels collision.” *University news. North-Caucasian region. Technical sciences series* 3(167) (2012): 8–12.

4. Tzannatos, Ernestos. "Human Element and Accidents in Greek Shipping." *Journal of Navigation* 63.1 (2010): 119–127. DOI: 10.1017/S0373463309990312.
5. Kolichestvo avariyy na vodnom transporte v 2015 godu uvelichilos' na 62%, bol'shaya chast' prikhoditsya na rybopromyslovyye suda. Web. 28 Aug. 2018 <http://portnews.ru/top_news/216552/>.
6. Human Element. International Maritime Organization. Web. 28 Aug. 2018 <<http://www.imo.org/OurWork/HumanElement/Pages/Default.aspx>>.
7. Koporulina, V. N., M. N. Smirnova, and N. O. Gordeyeva. *Psikhologicheskiy slovar'*. 3d ed. Rostov n/D: Feniks, 2004.
8. Akten, Necmettin. "Analysis of Shipping Casualties in the Bosphorus." *Journal of Navigation* 57.3 (2004): 345–356. DOI: 10.1017/S0373463304002826
9. Danilenko, A. Al., and A. An. Danilenko. "Professional reliability of crew as the most important prerequisite of the safety of the shipping." *Ekspluatatsiya morskogo transporta* 3(53) (2008): 30–35.
10. Hetherington, Catherine, Rhona Flin, and Kathryn Mearns. "Safety in shipping: The human element." *Journal of safety research* 37.4 (2006): 401–411. DOI: 10.1016/j.jsr.2006.04.007
11. Sazonov, A. Ye. "Chelovecheskiy faktor i bezopasnost' upravleniya podvizhnymi ob'yektami." *Sbornik materialov XVI Obshchego sobraniya akademii navigatsii i upravleniya dvizheniyem*. 2003. 6–8.
12. Patraiko, D., P. Wake, and Adam Weinrit. "e-Navigation and the Human Element." *Marine Navigation and Safety of Sea Transportation*. CRC Press, 2009. 55–60. DOI: 10.1201/9780203869345.ch5
13. Maurer, A. I., and O. A. Istomina. "Informatsionnaya peregruzka kak faktor avariynosti." *Vestnik Morskogo gosudarstvennogo universiteta* 15 (2007): 60–69.
14. Loginovsky, V. A., A. P. Gorobtsov, and V. E. Kuzmin. "The ISPS code as a component of onboard resources in Bayesian Analysis." In: *Nielsen, D. (ed.). Maritime Security and MET: 6th General Assembly of IAMU, Malmö, Sweden 24.-26.10.2005*. Southampton: WIT Press, 2005: 215–224.
15. Ermakov, Sergey Vladimirovich. "Preventive regulation of the human factor in marine navigation." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 5(39) (2016): 39–50. DOI: 10.21821/2309-5180-2016-8-5-39-50.
16. Korovin, A. G. "Razrabotka metodov vliyaniya chelovecheskogo faktora na bezopasnost' sudna." *Vestnik Kamchatskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* 10 (2009): 31–36.
17. Zinchenko, V. P., and B. G. Meshcheryakova, eds. *Psikhologicheskiy slovar'*. 2nd ed. M.: Pedagogika-Press, 1999.
18. Leont'yev, A. N. *Izbrannyye psikhologicheskiye proizvedeniya*. Vol. 2. M.: Pedagogika, 1983.
19. Fadyushin, S. G. "Proportional navigation and its use at control of vessel as an approach method to mobile object." *Modern problems of science and education* 4 (2012): 121.
20. Fadyushin, S. G. "Metody navedeniya sudna na dvizhushchiysya kosyak ryby." *Vestnik Morskogo gosudarstvennogo universiteta* 25 (2012): 90–95.
21. Fadyushin, S. G. "The Linear Assessment Model for Navigational Factors." *World Applied Sciences Journal* 29.5 (2014): 689–693. DOI: 10.5829/idosi.wasj.2014.29.05.13904.
22. Kann, V. L., and A. S. Kel'zon. *Teoriya Proportsional'noy Navigatsii*. L.: Sudostroyeniye, 1965.
23. Puasson, S. D. *Issledovaniya o veroyatnosti prigovorov v ugovolnykh i grazhdanskikh delakh*. Translated by O. B. Sheynina. 2nd ed. Berlin: N. G. Verl. (Viatcheslav Demidov), 2013.
24. Venttsel', Ye. S. *Teoriya veroyatnostey*. 11th ed. M.: KNORUS, 2010.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Фадюшин Сергей Геннадьевич —
 кандидат технических наук, доцент
 Дальневосточный федеральный университет
 690091, Российская Федерация, г. Владивосток,
 Суханова, 8
 e-mail: fadyushin.sg@dvfu.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Fadyushin, Sergey G. —
 PhD, associate professor
 Far Eastern Federal University
 8 Sukhanova Str., Vladivostok, 690091,
 Russian Federation
 e-mail: fadyushin.sg@dvfu.ru

Статья поступила в редакцию 28 августа 2018 г.

Received: August 28, 2018.

ВОДНЫЕ ПУТИ СООБЩЕНИЯ И ГИДРОГРАФИЯ

DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-5-936-950

GEOPHYSICAL TECHNOLOGIES FOR STUDY OF DEEP OIL GENESIS

D. A. Piinskiy, K. A. Roginskiy, O. Y. Ganzha

Shirshov Institute of Oceanology Russian Academy of Sciences,
Moscow, Russian Federation

Oil in the world is exploring less and less against the backdrop of increasing consumption, which is a serious concern of experts. They predict the achievement of the oil peak production, after which world oil production will begin to plummet. Such forecasts assume that oil is a product of biological decay and, as a consequence, it must end. The hypothesis of inorganic synthesis of hydrocarbons has been developed in the period of 1980 – 2010. Oil has an inorganic nature and is subject to other genesis in the bowels of the Earth. In this case, a different distribution of hydrocarbon reserves in the earth's crust and their replenishment is expected, both in a particular sedimentary basin, and on the planet as a whole. One of the evidences of the presence of deep oil can be the presence of hydrocarbon reserves in sedimentary-rock basins that have a genetic link with grabens, deep faults and deep-seated edges of lithospheric plates, which are limited by seismic geodynamic zones. In other words, seismic studies are needed to build geological models at greater depths. The paper describes the progress that has occurred over the past decade in marine technology for refracted waves seismic. Examples of seismic works for imaging the deep structures in comparison with conventional industrial methods are given. Paper proposes a project for deep geological study of Black Sea for resolving the deep oil genesis problem. If the theory of deep oil is proven, it will revolutionize the understanding of the earth's energy reserves.

Keywords: theory of hydrocarbon origin, seismic exploration methods, bottom seismographs, duplex waves, earth crust structure.

For citation:

Piinskiy, Dmitry A., Konstantin A. Roginskiy, and Oleg Y. Ganzha. "Geophysical technologies for study of deep oil genesis." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova* 10.5 (2018): 936–950. DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-5-936-950.

УДК 550.34

ГЕОФИЗИЧЕСКИЕ ТЕХНОЛОГИИ ДЛЯ ИЗУЧЕНИЯ ПРОЦЕССОВ ОБРАЗОВАНИЯ ГЛУБИННОЙ НЕФТИ

Д. А. Ильинский, К. А. Рогинский, О. Ю. Ганжа

Институт океанологии им. П. П. Ширшова РАН,
Москва, Российская Федерация

В мире открывается все меньше новых месторождений нефти, а ее потребление растет. В связи с этим появляются прогнозы специалистов относительно достижения пика нефтяного производства, после которого мировая добыча углеводородов будет стремительно падать. Эти оценки исходят из того, что нефть является продуктом биологического распада и поэтому её запасы ограничены. В период 1980 – 2010 гг. получила развитие гипотеза о неорганическом синтезе углеводородов, согласно которой нефть имеет неорганическую природу и подчиняется другим законам образования в недрах Земли, так называемая «глубинная» нефть. В этом случае ожидается иное распределение запасов углеводородов в земной коре и их восполнение как в отдельно взятом месторождении и в осадочном бассейне, так и на планете в целом. Одним из доказательств наличия глубинной нефти может служить запас углеводородов в осадочных бассейнах, имеющих генетическую связь с грабенами, глубинными разломами и глубокопогруженными краями литосферных плит, которые ограничены сейсмоактивными геодинамическими поясами, а также найденные месторождения углеводородов в кристаллическом фундаменте. Иными словами, необходимы сейсмические исследования, направленные на построения геологических моделей среды на больших глубинах и не только в осадочных бассейнах, но и в породах кристаллического фундамента, где существующие

промышленные сейсмические методы отраженных волн не действуют. В статье дано описание прогресса, произошедшего в течение последнего десятилетия в морских технических средствах для проведения сейсмических работ на море по методу преломленных волн. Приводятся примеры конкретных работ, позволивших получить изображения глубинных структур и добиться повышения глубинности и информативности исследований по сравнению с обычными промышленными методами. В статье предложен проект изучения глубинного строения Черного моря для решения задач происхождения глубинной нефти. Если теория глубинной нефти будет доказана, то это произведет революцию в существующих представлениях об энергетических запасах Земли.

Ключевые слова: теория происхождения углеводородов, сейсмические методы разведки, донные сейсмографы, дуплексные волны, строение земной коры.

Для цитирования:

Ильинский Д. А. Геофизические технологии для изучения процессов образования глубинной нефти / Д. А. Ильинский, К. А. Рогинский, О. Ю. Ганжа // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2018. — Т. 10. — № 5. — С. 936–950. DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-5-936-950.

Введение (Introduction)

Как известно из источника [1], для изучения условий образования глубинной нефти необходимо знать структуру консолидированной части земной коры, лежащей глубже осадочного чехла. Ряд гипотез образования глубинной нефти связывает этот процесс с путями миграции флюидов в консолидированной коре по системе трещин как в вертикальном, так и в горизонтальном направлениях. Потоки флюидов затем проникают в осадочный чехол, способствуя образованию нефтяных месторождений.

По результатам обобщения глубинных сейсмических исследований земной коры [2] были выявлены зоны пониженных скоростей, которые характеризуются также повышенной проводимостью (по результатам глубинных электромагнитных исследований). Кроме того, результаты проведенных глубинных сейсмических исследований позволяют выделить зоны нарушений, проявляющихся в виде глубинных разломов или зон повышенной трещиноватости, которые могут быть заполненными флюидами или сухими. Такие зоны в земной коре имеют повышенную проницаемость. Гипотезы образования глубинной нефти связывают эти объекты земной коры с зонами миграции флюидов, которые приводят к образованию глубинной нефти.

Современное развитие технологий сбора сейсмических данных, касающихся (особенно при проведении морских исследований) точности службы времени и навигации, чувствительности каналов, собственного шума приемного сейсмического тракта и динамического диапазона регистрации данных, позволяет собирать качественные сейсмические глубинные данные для точной идентификации аномальных зон в земной коре, связанных с миграцией глубинной нефти.

Развитие методов обработки данных позволяет уверенно выделять аномальные зоны, связанные с возможным образованием глубинной нефти. Обработка рассеянной компоненты волнового поля дает возможность получать изображение зон трещиноватости в консолидированной земной коре, а также разделять *флюидонасыщенные* и *сухие* системы трещин. Особенно интересно проводить детальные глубинные исследования в районах с уже открытыми большими месторождениями. Полученное глубинное строение коры, возможно, позволит установить связь открытых нефтяных резервуаров с выявленными особенностями строения земной коры. В период с 2009 по 2016 гг. разработаны новые донные сейсмические инструменты для работ на глубинах моря от 0 до 7 км. Одним из способов применения этих инструментов является проведение глубинных сейсмических исследований на море на всю глубину до границы Мохоровичича методом широкоугольного сейсмического профилирования.

В данной статье описываются новые свойства донных инструментов, их характеристики и примеры успешного применения для изучения строения земной коры. Предложены новые проекты изучения строения земной коры на примере Черного моря, выполнен расчет времени проведения работ и описаны полученные результаты.

Методы и материалы (Methods and Materials)

Начало 2000-х гг. ознаменовано разработкой и использованием ряда компактных самовсплывающих донных сейсмографов. В России к таким разработкам относятся исследования Опытного конструкторского бюро океанологической техники по заказу компании ЛАРГЕО. Донные станции успешно использовались не только для исследования земной коры, но и для осадочных подбазальтовых структур и газогидратов в океане (рис. 1). Аналогичная аппаратура была создана в Германии вначале как опытная разработка Гамбургского университета, а затем модернизированная в России в ООО «ГеоПро». Несмотря на то, что станции постоянно модифицировались, основные технические параметры оставались на уровне начала 2000-х гг. Кроме выпуска станций для собственных нужд, компания выпустила и продала около 60 станций другим институтам и организациям с широкой географией от Европы до Азии, включая Индию, Китай, США (Университет Техаса) и Россию (Институт океанологии им. П. П. Ширшова Российской Академии наук). Как и российская разработка компактных самовсплывающих донных сейсмографов, станция ГеоПро нашла свое применение не только для глубинных исследований земной коры, но и для нужд нефтяной промышленности, а также для изучения локальной сейсмичности и инженерных работ. В частности, в 2002 г. была проведена первая в мире трехмерная площадная донная сейсмическая съемка на глубинах около 2 км в Мексиканском заливе.

На примере исследования разработки второго поколения станций компании «Геонод Разведка» дадим подробный ответ на вопрос: в чем заключаются изменения в развитии технологии разработки донных сейсмических станций в течение последних десяти лет.

1. Существенно изменилась элементная база, электронные приборы минимизировались, и соответственно, уменьшилось энергопотребление и собственные шумы. Все это позволило создать компактную станцию размером 330 мм в диаметре вместо 450 мм. При этом вес ее снизился вдвое, причем автономность не только не уменьшилась, но и увеличилась до 90 сут за счет уменьшения энергопотребления и увеличения емкости элементов питания. Увеличился динамический диапазон регистрируемых сейсмических сигналов за счет как уменьшения собственных шумов электронной аппаратуры, так и использования 24-разрядных аналого-цифровых преобразователей. Уменьшились размеры приборов, снизилось их энергопотребление, а точность кварцевых часов улучшилась на порядок. При этом создание оптимальных алгоритмов временной привязки позволило достичь точности около 1 мс в течение всего времени автономной работы станции.

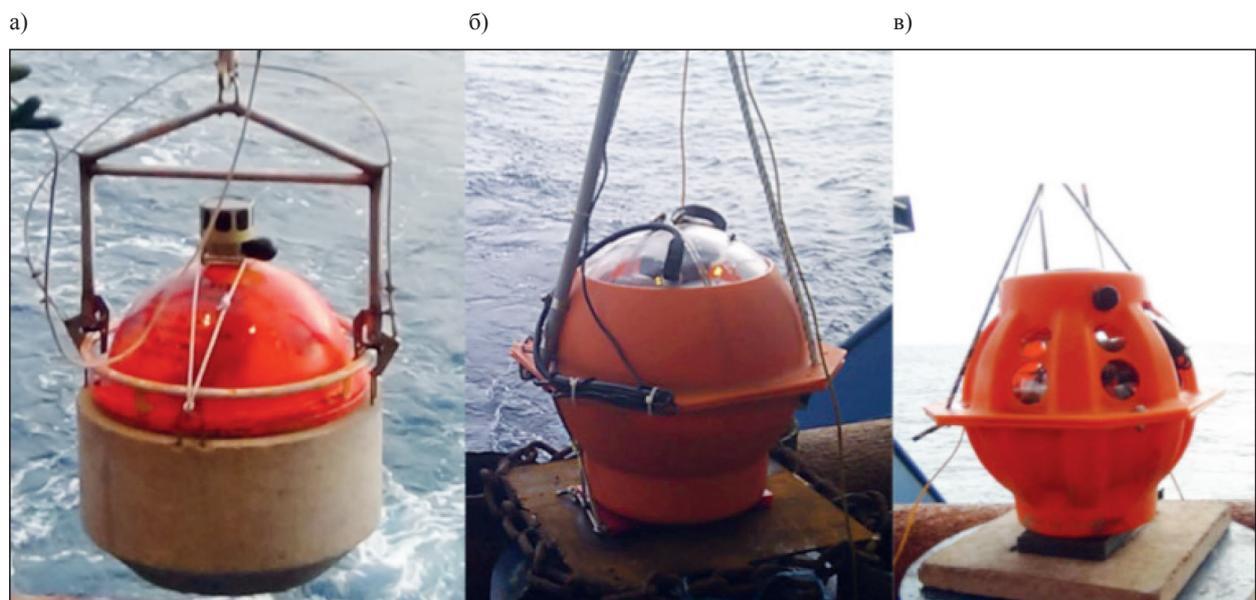


Рис. 1. Три поколения самовсплывающих сейсмических донных станций для глубинных исследований земной коры:
а — ЛАРГЕО-ОКБ (2004 г.); б — ГЕОПРО (1996–2008 гг.);
в — ГЕОНОД (2014 г.)

Технология современной высокоскоростной беспроводной передачи данных позволила создать «необслуживаемую» станции в период ее автономной работы. Станция дает возможность ее многократного использования на различных участках морского дна без вскрытия глубоководного контейнера для скачивания данных, зарядки батарей, синхронизации часов и дает возможность избежать повторной герметизации ее корпуса. Трудозатраты на работу со станциями многократно снижаются, что особенно важно в полевых условиях для минимизации времени работы и, соответственно, уменьшения использования дорогостоящего судового времени (данные приведены в таблице).

Сравнение технических характеристик трех поколений самовсплывающих донных регистраторов от трех разных производителей

Параметр	Сейсмические донные станции		
	ЛАРГЕО-ОКБ	ГЕОПРО	ГЕОНОД
Разрядность АЦП	21	24	32
Автономность работы	8 дней	14 дней	90 дней
Стабильность часов	2×10^{-8}	2×10^{-8}	5×10^{-9}
Синхронизация часов	Внешний GPS, открытие корпуса	Внешний GPS, открытие корпуса	Встроенный GPS, автоматическая синхронизация через корпус
Емкость накопителя данных	6 Гб	32 Гб	32 Гб
Способ копирования данных	Открытие корпуса	Открытие корпус или через подключаемый кабель	Беспроводной USB, 15 Мбит/с
Частотный диапазон геофонов	5 Гц–1 кГц	1 Гц–1 кГц	0,5 Гц–1к Гц
Средства обнаружения на море	Лампочка	Лампочка, радиопеленг, флаг	Лампочка, радиопеленг и передача координат, флаг
Вес без якоря	40 кг	35 кг	20 кг
Диаметр сферы	45 см	43,2 см	33 см
Размыкатель	Электрохимический (только соленая вода)	Электрохимический (только соленая вода)	Электрохимический / электромеханический (любая вода)
Возможность модификации якоря	Нет	Да	Да
Дополнительные датчики	Наклономер компас	Компас	Компас, 3Д-акселерометр, датчики температуры и давления, монитор расхода емкости батарей, самотестирование
Состав якоря – экология	Железобетонный	Железный	Саморазлагающийся на компоненты морского дна и воды, экологически чистый

Существенным фактором является создание надежной системы всплытия, которая включает в себя наряду с качественной гидроакустической связью надежный размыкатель не только электрохимический, но и механический, позволяющий использовать оборудование также и в пресной воде. Опыт применения станций позволил понять причины невозможности всплытия станций

на поверхность, основной из которых оказалось засасывание станции рыхлыми осадками на дне. Простейшее устройство в виде выталкивающих пружин позволяет с высокой вероятностью обеспечить отрыв станции от якоря. Изменилась и схема поиска станций на поверхности. Если раньше это был визуальный поиск, то теперь по радиоканалу передаются координаты, и поиск возможен 24 ч в сутки даже при плохой видимости. В ночное время станция хорошо видна по сигнальной лампе, находящейся внутри.

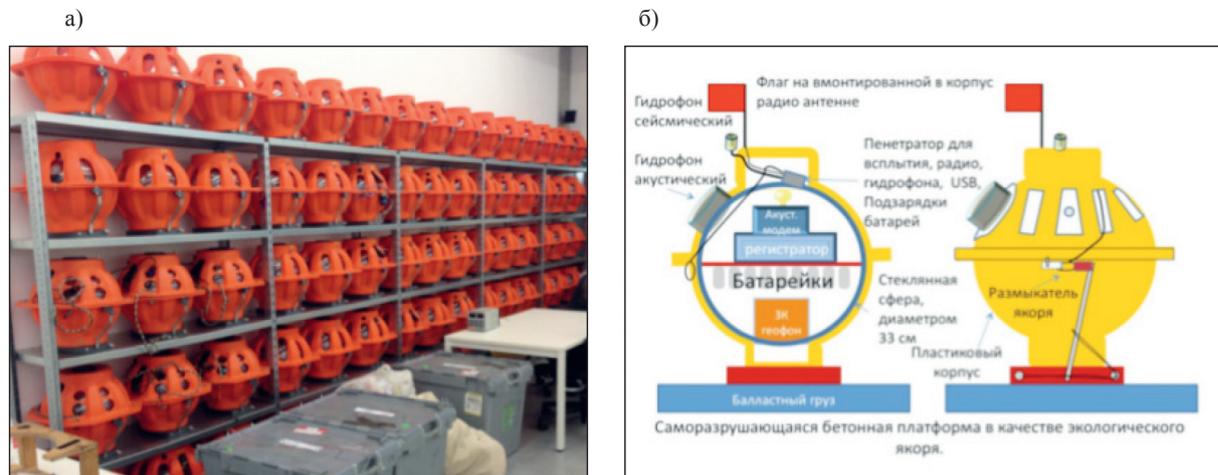


Рис. 2. Фотография парка станций (а) и схема самовсплывающей станции «Геонод» (б)

Созданный парк станций «Геонод» (рис. 2, а) применялся как для работ в транзитных зонах [4], так и в глубоководных проектах [5]–[6]. На основе регистратора донной станций была создана и испытана широкополосная восьмиканальная кабельная сейсмологическая станция, работающая по протоколам реального времени [7].

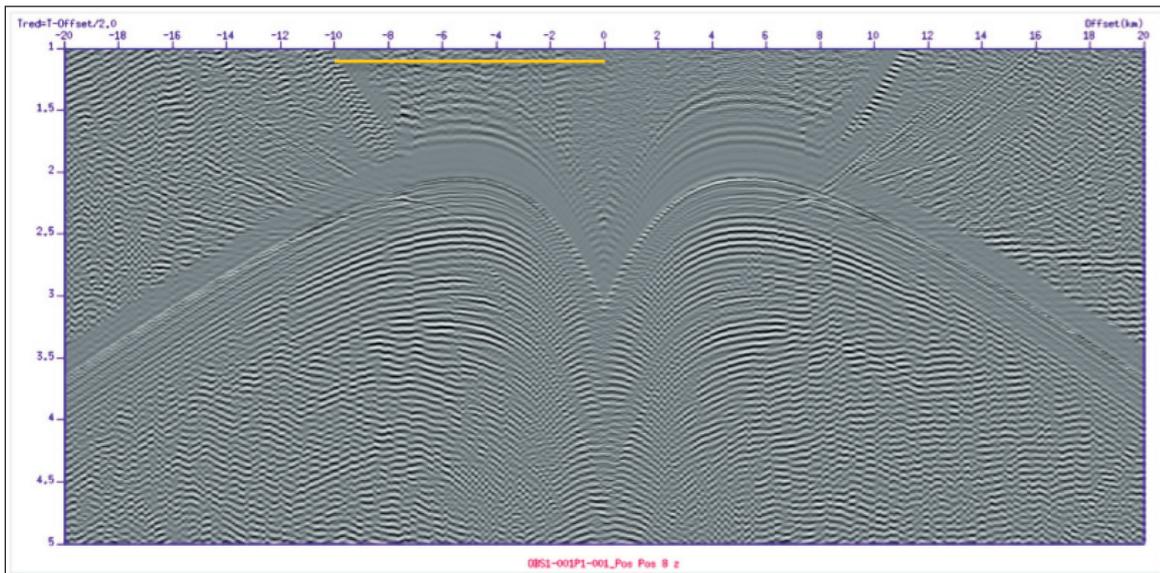
Ключевые характеристики станций [3] — рис. 2, б:

- малое потребление энергии — нет перерыва на подзарядку при съёмке;
- беспроводное копирование собранных данных после всплытия на поверхность — многократные быстрые перестановки на дне;
- экологический якорь разлагается в воде после проведения съёмки на составляющие окружающей среды.

2. Появилось различное математическое обеспечение, позволяющее в разы уменьшить время обработки и интерпретации. Расчет прямых кинематических задач происходит за доли секунд на ноутбуках. Визуализация возможна не только в виде отдельных трасс, но и в цвете с различными параметрами обработки исходных сейсмограмм (рис. 3). Это дает возможность увидеть не только первые вступления, но и последующие. Развились методы томографии как по первым вступлениям, так и многоволновая томография, когда возможен учет различных типов волн. Основные операции происходят с помощью работы с экранными формами, а не с цифрами, вводимыми вручную. Визуализация дает возможность выполнения оперативной и наглядной интерпретации выделяемых для обработки волн.

3. Изменился подход к процессу получения скоростных глубинных разрезов. Классическая схема работы всегда включала пикирование вступлений, их идентификацию, получение данных с наблюдаемых годографов, сравнение ее с расчетным временем путем кинематического моделирования по изменяемой скоростной модели и смены идентификации пикированных годографов при необходимости. Для получения первичной информации для скоростного разреза применялась томография по первым вступлениям, т. е. вся работа по созданию скоростной модели происходила на поле годографов, получение которого существенно зависит от квалификации и опыта геофизика и привносит большую долю субъективности и неопределенности.

а)



б)

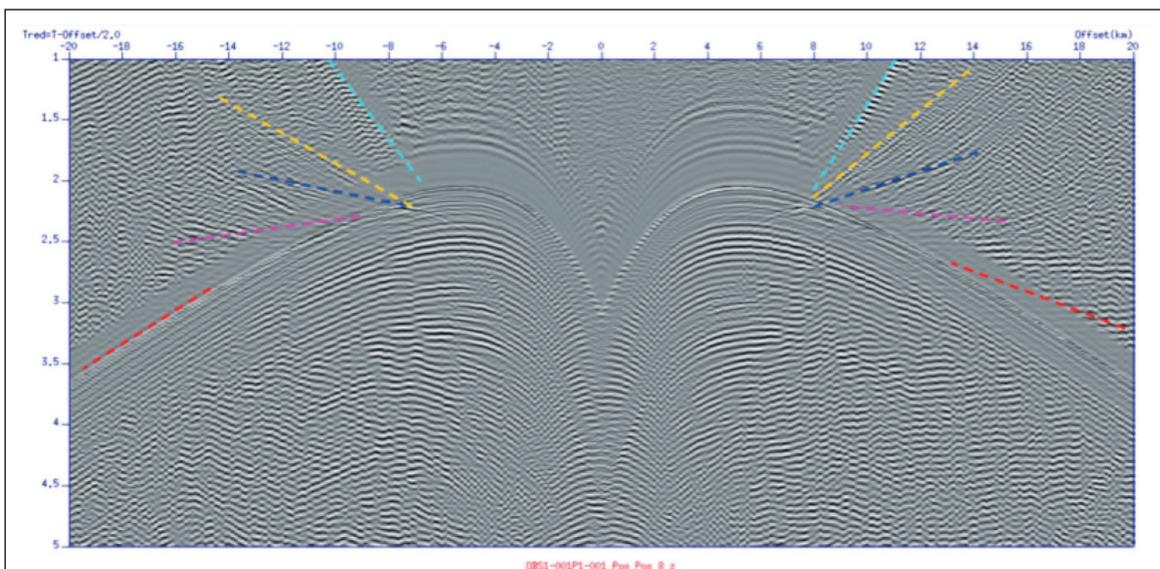


Рис. 3. Пример сейсмограммы общей точки приема с введенной линейной поправкой со скоростью 2 км/с:

а — пример сейсмограммы общей точки приема с введенной линейной поправкой со скоростью 2 км/с

Вертикальный геофон: идентификация слоев по вступлениям отраженных и преломленных волн.

Выбранная апертура наблюдений — 40 км (для сравнения желтой линией показана длина буксируемой косы в 10 км),

горизонтальная шкала: удаление источник – приемник, км;

вертикальная шкала времени в редуцированном масштабе: $T_{ред} = T - \text{удаление (км)} / 2$ км/с;

б — пример сейсмограммы общей точки приема с введенной линейной поправкой со скоростью 2 км/с

Вертикальный геофон: идентификация слоев по вступлениям отраженных и преломленных волн.

Выбранная апертура наблюдений 40 км, горизонтальная шкала: удаление источник – приемник, км;

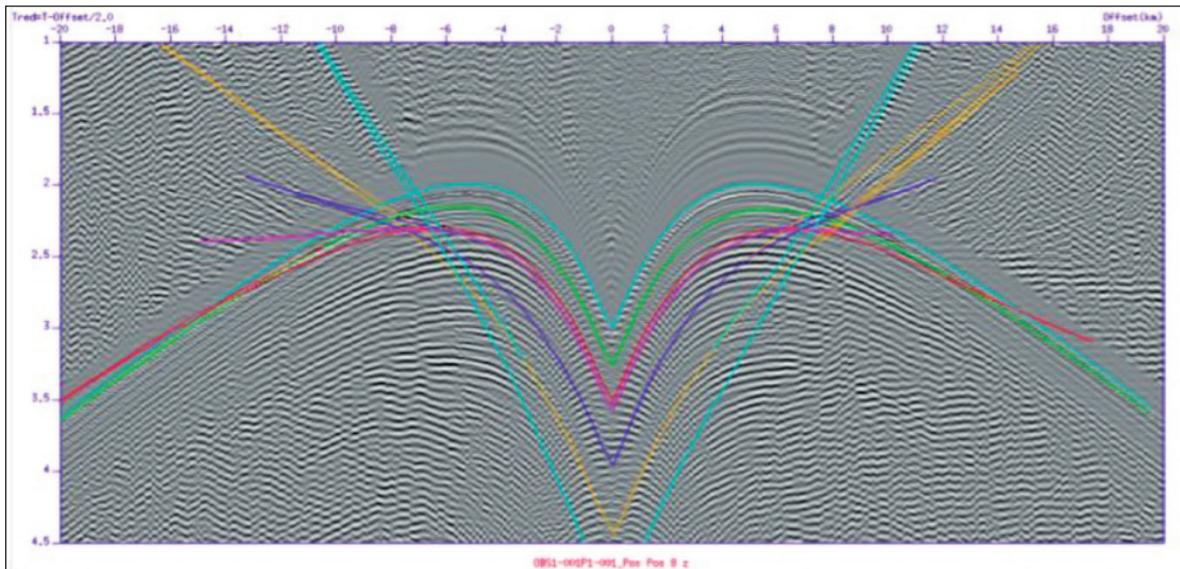
вертикальная шкала времени в редуцированном масштабе: $T_{ред} = T - \text{удаление (км)} / 2$ км/с

Необходимо также отметить ограниченность применения метода послойной томографии при создании слоистых моделей. Этот метод дает неплохие результаты только для простых моделей. При малом объеме информации он требует довольно хорошего приближения к истинной скоростной модели, в противном случае процесс может не привести к правильному решению.

В настоящее время развитие графического экранного интерфейса дает возможность выделять вступления волн на поле сейсмических трасс (сейсмограмм общей точки приема) с последу-

ющим наложением на него расчетных годографов при одновременном контроле идентификации вступлений с помощью лучевых диаграмм.

а)



б)

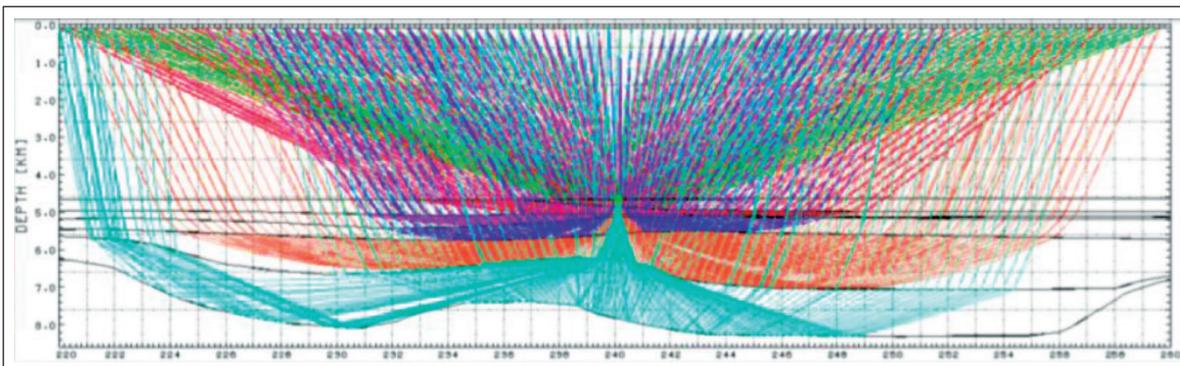


Рис. 4. Пример сейсмограммы общей точки приема с введенной линейной поправкой со скоростью 2 км/с:
а — выделение вступлений волн на поле сейсмических трасс;
б — результирующий разрез, полученный с помощью моделирования лучевым методом

В настоящее время развитие графического экранного интерфейса дает возможность выделять вступления волн на поле сейсмических трасс (сейсмограмм общей точки приема) с последующим наложением на него расчетных годографов при одновременном контроле идентификации вступлений с помощью лучевых диаграмм (рис. 4). На рисунке результирующий разрез получен с помощью моделирования лучевым методом времени пробега от идентифицированных слоев по всем наблюдаемым станциям. Подбор скоростной модели выполняется с помощью расчета прямой кинематической задачи, что ускоряет получение финального разреза с хорошей увязкой волнового поля. Особенно данный метод хорошо работает при построении осадочного чехла, который не виден в первых вступлениях и обычно брался из разрезов методом отраженных волн общей глубинной точки (МОВ — ОГТ) в случае, если они присутствовали, иначе расслоение осадков обнаружить не удавалось. Таким образом, удалось приблизиться к действительно многоволновой сейсморазведке.

Результаты (Results)

Приведем некоторые существенные характеристики морской сейсмической 2Д съемки с донными регистраторами. Точность привязки станций на дне, даже при больших глу-

бинах (более 4 км), достигает 2 м. Точное определение положения сейсмометра на дне важнее для дальнейшей обработки, чем точка сброса станции на поверхности моря, установленная по предварительному плану съемки. Точность хода часов по отношению к точному времени GPS/GLONASS ± 1 мс. Большой мгновенный динамический диапазон регистрации составляет не менее 125 дБ. Для сравнения здесь приведены активные данные, полученные в 2004 г. с пневмоисточником, имеющим общий объем 5000 куб. дюймов при глубинах моря около 3,7 км. Тогда максимальное удаление источника от приемника, на котором прослеживались критические отраженные и преломленные волны, составило около 110 км. В 2015 г., при проведении работ со сходным объемом сейсмического источника (5500 куб. дюймов) и глубиной моря около 4,5 км в районе, близком к проведению работ 2004 г., максимальное удаление наблюдаемых волн уже составило около 260 км при его типичном значении 110 км. Также приводятся примеры выделения осадков в последующих вступлениях, сравнение скоростной модели, полученной с помощью донных регистраторов с разрезом методом отражённых волн общей глубинной точки МОВ ОГТ. Для сравнения: временные затраты для получения скоростной модели с донными регистраторами на профиле длиной 420 км составили три недели, включая морские работы. В то же время затраты на получение окончательного разреза ОГТ на этом же профиле составили по времени около 3 мес., включая морские работы и обработку данных на берегу. Глубинный диапазон исследований с донными станциями позволяет проследить строение земной коры до верхней мантии, в то время как на разрезах ОГТ виден в основном осадочный чехол до поверхности консолидированной коры, а иногда удается увидеть отражения от слоев нижней коры, которые можно надежно интерпретировать только при сопоставлении с результатами донных наблюдений.

На рис. 5–7 показаны профили и результаты глубоководных морских работ с сейсмическими донными станциями «Геонод», выполненные по заказу крупнейшей добывающей индийской государственной нефтегазовой корпорации (ONGC) в 2012 г.

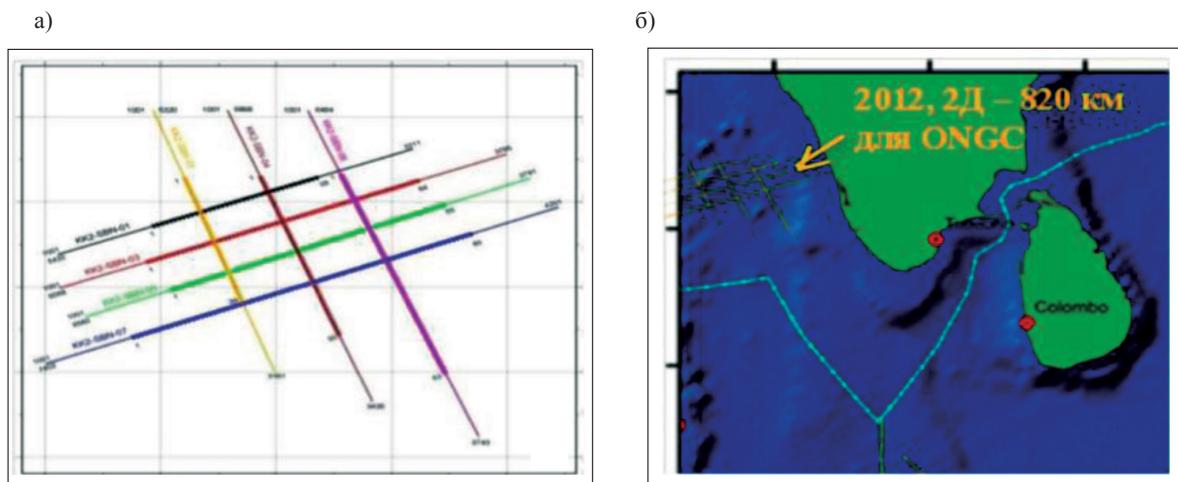


Рис. 5. Глубоководные морские работы 2012 г. в Лаккадивском море:

- а — схема расположения 2Д профилей с донными регистраторами (800 пог. км с расстоянием между станциями 2 км (всего 420 постановок донных станций, семь профилей));
- б — положение профилей на батиметрической карте Индийского океана

Обработка рассеянной компоненты сейсмического поля, в особенности дуплексных обменных рассеянных волн, использующих все три компоненты записи на геофонах, дает важную дополнительную информацию не только для картирования трещиноватости в земной коре, но также и для распознавания флюидо-насыщенных и сухих трещин.

Канадская компания *TetraSeis Inc.* разработала новый тип глубинной миграции до суммирования, которая называется *дуплексно-волновой миграцией* (ДВМ), и получили патент США на эту технологию в 2005 г. ДВМ способна строить изображения вертикальных и близких к верти-

кальным ($90^\circ \pm 30^\circ$) структур. ДВМ-технология предоставляет непосредственные доказательства существования близко вертикальных структур и позволяет определять их местоположение [8], [9]. В качестве модификации метода ДВМ для многокомпонентной регистрации и использования многоволновой сеймики авторами дуплексной миграции был предложен метод миграции двух взаимных полей, получаемых на трехкомпонентном геофоне.

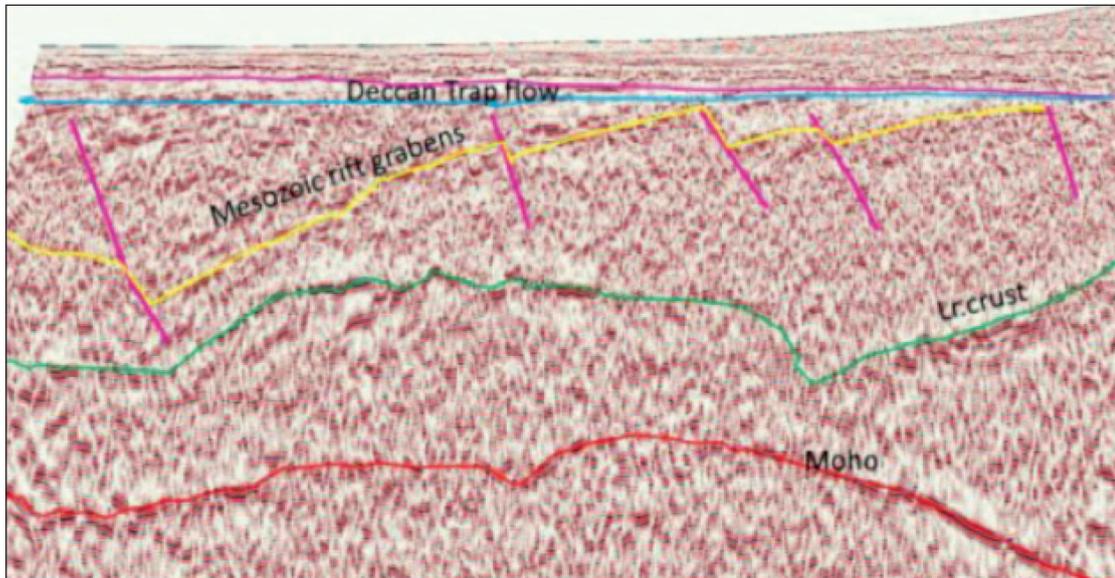


Рис. 6. Пример 2Д изображения, полученного по данным съемки с донными регистраторами в Лаккадивском море

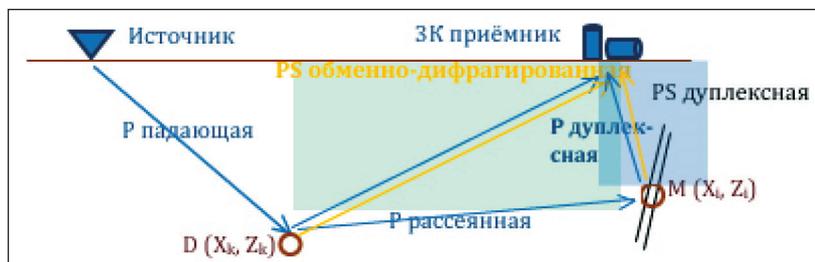


Рис. 7. Лучевая диаграмма, объясняющая образование дуплексных обменных волн

Для реализации миграции используются два взаимно образующих волновых поля. В частности, это могут быть поля продольных и поперечных волн. S -волны образуются как результат обмена P -волн на целевых близко расположенных вертикальных неоднородностях изучаемой геологической среды. Первичная падающая от источника P -волна рассеивается на точках дифракции среды и в виде рассеянной P -волны достигает близко расположенной вертикальной целевой границы. Приемники записывают эту волну как обменную дуплексную PS -волну после обмена на близко расположенной вертикальной границе. Аналогичный путь может быть пройден первичной падающей S -волной и тогда приемники запишут SP -обменную волну. Предлагаемый метод работает как с разделенными полями (представленными отдельно на разных сейсмограммах), так и с неразделенными полями (представленными на одной и той же или на разных сейсмограммах).

Синий прямоугольник на рис. 7 показывает область, где должна быть известна скорость продольных и поперечных волн для миграции взаимных дуплексных волн, а зеленый — область, где должны быть известны скоростные модели P и S для миграции взаимных дифрагированных волн. Для простоты рассмотрим случай, когда P - и S -волны разделены. Такое разделение являет-

ся характерным для наземных наблюдений при значительной зоне малых скоростей. В этом случае все волны будут распространяться субвертикально к поверхности наблюдений, в результате чего на Z -компоненте будут регистрироваться преимущественно P -волны, а на X -компоненте — SV -волны. В случае, когда поля не разделены, например, проводятся наблюдения вертикальное сейсмическое профилирование (ВСП) или при помощи донных многокомпонентных приемников на вход миграции можно подавать одну и ту же компоненту волнового поля, предполагая, что на ней присутствуют оба поля. В случае разделения полей отраженные и проходящие обменные волны будут регистрироваться на X -компоненте и используя продолжение волнового поля вниз, их можно сфокусировать на породивших их неоднородностях. Для этого достаточно иметь скоростную модель продольных и поперечных волн выше этих точек и необязательно знать скорости в нижней части разреза, где произошло первое дуплексное отражение. По этой же причине в данном случае не требуется знание скоростей на участке от пункта возбуждения до точек первого отражения. Т. е. требования к скоростной модели и, соответственно, к неоднородностям, не учтенным этой скоростной моделью, существенно снижаются, что весьма важно при работе в кристаллическом фундаменте.

Теперь рассмотрим продольные волны, которые будут фиксироваться на Z -компоненте и при помощи продолжения волнового поля вниз вернем их назад к вертикальным неоднородностям. Для этого необходимы скорости продольных волн над рассматриваемыми неоднородностями. Свойством такого продолженного поля будет то, что на искомым неоднородностях, где произошел обмен, время прихода продольных волн будет совпадать со временем прихода обменных PS -волн. Таким образом, если продолжить вниз поля Z - и X -компонент (сейсмограмму общего пункта возбуждения) и на каждом уровне Z_i провести взаимную корреляцию продолженных полей, выполненную по формуле $F(X_i, Z_i) = \sum_{\omega} U_{xi}(X_i, Z_i, \omega) U_{zi}^*(X_i, Z_i, \omega)$, где $*$ — комплексное сопряжение; ω — частота сигнала, $U_{xi}(X_i, Z_i, \omega)$ и $U_{zi}(X_i, Z_i, \omega)$ — продолженные волновые поля в спектральной области, относящиеся к точке (X_i, Z_i) , то последняя, в соответствии с принципом Клайрбоута [10], даст сейсмическое изображение среды $F(X_i, Z_i)$ на соответствующем уровне. В формировании такого изображения будут автоматически участвовать все типы продольных и обменных волн, как дуплексные монотипные и обменные, так и отраженно-проходящие монотипные и обменные. Кроме того, будет формироваться изображение по обычным однократно отраженным и обменным волнам, так как в точках отражения разделение волн на продольные и обменные будет аналогичным. Это означает, что в условиях дискретно неоднородной среды будут формироваться изображения первичных рассеивателей (диафрагмирующих объектов), участвующих в формировании рассеянно-дуплексной волны. Продолжение волнового поля вниз может быть при помощи применения любого из известных алгоритмов, а именно: решения волнового поля в спектральной области; конечно-разностного решения одно- и двухстороннего волнового уравнения; решения на основе интеграла Кирхгофа и др.

Обсуждение (Discussion)

Появление новых технологий сбора и обработки данных, рассмотренных ранее, позволяет получать значительно более информативную картину строения земной коры при одновременном уменьшении затрат на проведение исследований. Для иллюстрации новых возможностей предлагается рассмотреть *проект изучения глубинного строения земной коры для исследования происхождения глубинной нефти на примере Черного моря*. Изученность глубинной структуры земной коры Черного моря в настоящее время явно недостаточна, особенно по сравнению с изученностью строения осадочного чехла, выполненного по технологии буксируемых кос (рис. 8) [11], [12].

На рис. 9 показаны примеры того, что могут дополнительно дать исследования с донными станциями на длинных профилях по сравнению с результатами, полученными с помощью буксируемых кос на примере работ 2005 г. (длинный профиль в котловине) и 2011 г. (профиль, оттененный зеленым фоном на рис. 10).

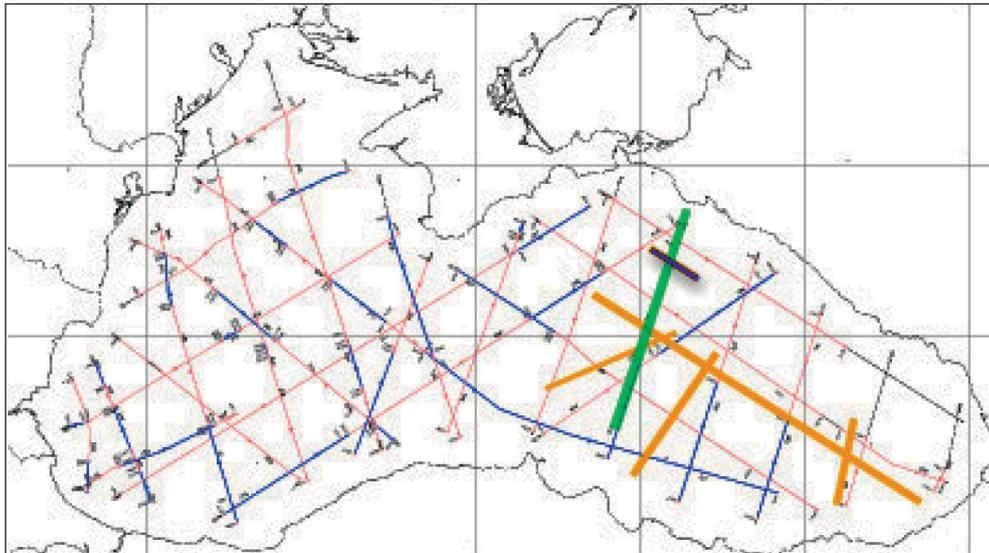


Рис. 8. 2Д-метод отраженных волн общей глубинной точки исследования с длиной косой (10 км) на судне «Мезень» (красные и синие линии), профиль с донными станциями ИОАН 2004 (пять постановок донных станций) — фиолетовая линия, профили 2005 г. (82 постановки донных станций) — желтые линии

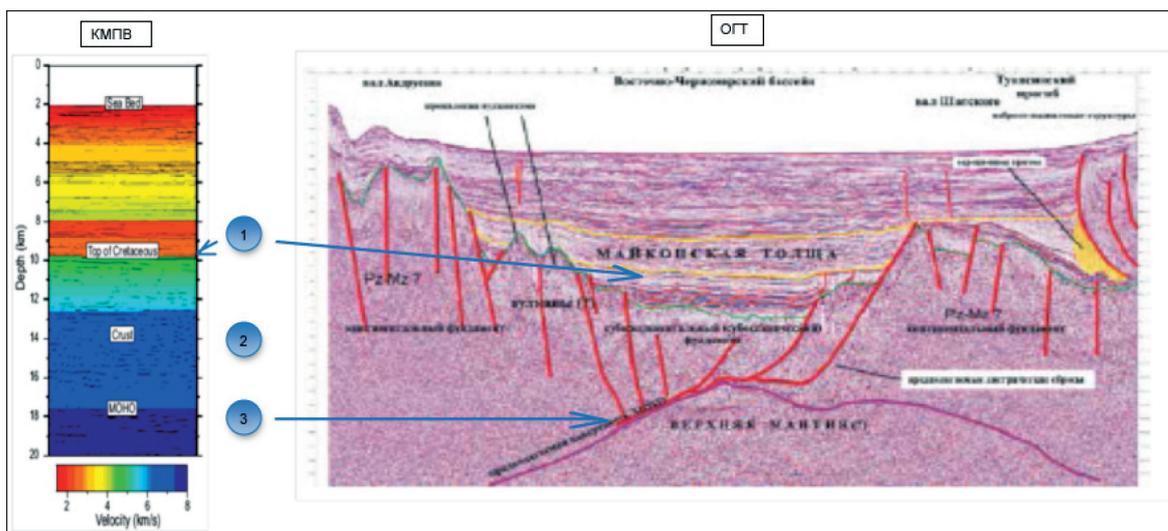


Рис. 9. Сравнение данных метода отраженных волн общей глубинной точки и комплексного метода преломленных волн по профилю в Черном море

Донные наблюдения дополнительно к данным с длиной буксируемой косы (10 км) дают следующую информацию:

1. Определена зона пониженных скоростей перед кровлей Мела, не выявленная по данным ОГТ.
2. Получена тонкая консолидированная океаническая кора (только 5 км толщины).
3. Доказано более мелкое залегание границы Мохоровичича — 18 км, ранее давались оценки в 24 км, эта граница плохо и неопределенно прослеживается на разрезе ОГТ, ее приходится определять на этапе интерпретации.

Для поисков источников глубинной нефти и определения природы ее происхождения предлагается провести донную съемку по системе региональных профилей Международной исследовательской программы 2011 г., выполненных с длиной косой, равной 10 км. Кроме того, пред-

лагаются продолжить региональные длинные профили с донными регистраторами выполненные в 2005 г. в Восточно-Черноморской котловине Институтом океанографии Саутгемптонского университета Великобритании [13]–[15]. Работы на длинных региональных профилях по изученным 2Д судном линиям дадут возможность:

– получить надежную скоростную модель для P - и S -волн и тем самым дать более точное положение глубинных осадочных слоев, поверхности и морфологии кристаллического фундамента и Мохо;

– по различиям в скоростных разрезах и поведению морфологии границ выделить типы коры для Черного моря, основные глубинные элементы, имеющие определяющие значение для восстановления истории развития и формирования современной коры Черного моря.

Основной проблемой, возникающей при обосновании стратиграфической привязки мезозойских горизонтов в пределах Российского сектора Черного моря, является отсутствие скважинных данных, а также сложность прямой передачи стратификации от скважин, пробуренных на суше, обусловленная отсутствием сейсмических профилей в переходной зоне суша – море. Донные станции могут заполнить этот пробел, так как у них нет ограничений, связанных с работой на малой и предельно малой глубине, и выполнить работы по технологии МОВ ОГТ в переходной зоне для связи морских данных с сухопутными скважинами.

Выделяемый в разрезе вала Шатского (в районе структуры Палласа) Келловей-Верхнеюрский сейсмостратиграфический подкомплекс по кинематическим и динамическим характеристикам близок как к надвинутому с севера мел-палеогеновому флишевому комплексу Анапского выступа, так и к подстилающим его нижнесреднеюрским породам переходного метаморфизованного комплекса. Наиболее надежным способом определения его литотипа является скоростной анализ с использованием данных преломленных и закритически отраженных волн, полученных на длинных профилях, пересекающих эту структуру вдоль и поперек оси вала Шатского. Данные, полученные с помощью донных станций, позволят решить эту проблему.

Кроме того, выполнение работ с донными станциями на длинных профилях позволит решить следующие актуальные задачи изучения геологического строения Черного моря:

1. Определить глубину залегания кристаллического фундамента на валу Шатского и в Туапсинском прогибе на длинных профилях с донными регистраторами, проследить морфологию поверхности фундамента, определить скорость поперечных и продольных волн в нижней части осадочного чехла и в фундаменте, уточнить толщину коры.

2. Прояснить генезис образования Восточно-Черноморской впадины. На современных палеотектонических реконструкциях вал Шатского, уже начиная с байосского времени (171 млн лет), соприкасался непосредственно с понтидами южного берега Черного моря. Осадочные горизонты, соответствующие этому геологическому времени, являются последними видимыми отражениями на разрезах, полученных с помощью буксируемых кос. Исследования с донными станциями позволят продлить известную геологическую историю в более раннее время, а также полнее использовать аналогии в строении турецкого сектора Черного моря для прогнозирования нефтегазоносности Российского сектора и поисков глубинных источников нефти.

3. Дать более определенную датировку осадков нижней части осадочного чехла, так как профили с донными станциями 2005 г. проходили через пробуренные скважины, а их продолжение в Российский сектор позволит привязать новые сейсмические изображения к данным бурения.

4. Определить существование, объем и местоположение продуктов рифтового подплавления в форме подкорковой интрузии или вулканических образований.

5. Определить тип расширения земной коры в центре котловины и направление, относительно которого сопряженные континентальные окраины симметричны.

6. Определить, как расширение коры распределено между верхней и нижней корой.

7. Определить природу утончения земной коры поперек восточной Черноморской котловины и сопряженных с ней континентальных окраин.

8. Определить историю развития напряжений в котловине.

Заключение (Conclusion)

Таким образом, глубинные работы, выполненные в последнее десятилетие с помощью четырехкомпонентных донных станций, убедительно доказывают возможность исследования глубоких геологических горизонтов, которые недоступны наиболее распространенной в промышленности технологии МОВ ОГТ с буксируемыми косами. Донная аппаратура и технология работы с ней должны быть использованы для получения информации о происхождении углеводородов. Если теория глубинной нефти будет доказана, то это произведет революцию в существующих представлениях о земных запасах энергоносителей. В настоящем исследовании предложен проект изучения глубинного строения котловины Черного моря для решения проблем происхождения глубинной нефти.

Работа выполнена в рамках государственного задания ИО РАН (тема № 0149-2018-0011).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Дегазация Земли: геодинамика, геофлюиды, нефть, газ и их парагенезисы: Материалы Всероссийской конференции, Москва, 22–25 апреля 2008 г. / Отв. ред. А. Н. Дмитриевский, Б. М. Валяев. — М: ГЕОС, 2008. — 622 с.
2. Павленкова Н. И. Роль глубинных геофизических исследований в решении проблемы дегазации земли и формирования неорганической нефти / Н. И. Павленкова // Глубинная нефть. — 2013. — Т. 1. — № 6. — С. 811–824.
3. Ilinski D. A. Innovation in exploration technologies for Russian shelf / D. A. Ilinski, E. B. Chirkov // RAO/CIS OFFSHORE 2011 PROCEEDINGS. — SPb.: Chimizdat, 2011. — Pp. 150–156.
4. Ilinski D. A. Innovative approach and mobile technology of seismic surveying in tidal flats a hard-to-reach Arctic areas / D. A. Ilinski, A. Y. Razumov, A. A. Korneev, A. M. Rusalin, I. A. Gots // Seismic Equipment. — 2013. — Vol. 49. — No. 2. — Pp. 58–70.
5. Manoj Kumar Bhartee. Wide Angle Reflection-Refraction profiling (WARRP): “An effective tool for subsalt exploration” – A case study/ Manoj Kumar Bhartee, Karad Kapil // 10th Biennial International Conference & Exposition. — Kochin, 2013. — Pp. 1–5.
6. Chandrasekhar N. Challenges of Sub-basalt Mesozoic Exploration of Kerala Konkan offshore area and solutions through Long offset seismic & Sea Bed Node(SBN) data analysis / N. Chandrasekhar, D. K. Panda, K. C. Das, P. Rajappan, P. K. Bhowmick // 10th Biennial International Conference & Exposition. — Kochin, 2013. — Pp. 1–5.
7. Levchenko D. G. Study case of development and field testing of multifunctional cable sea bottom seismic recorder / D. G. Levchenko, L. I. Lobkovskiy, D. A. Ilinski, I. B. Raushenbach, V. V. Ledenev, K. A. Roginskiy // Seismic Equipment. — 2014. — Vol. 50. — No. 4. — Pp. 23–35.
8. Patent US 7,110,323 B2. Method, system and apparatus for interpreting seismic data using duplex waves / N. Marmalyevskyy, Z. Gornyak, A. Kostyukevych, V. Mershchiy, Y. Roganov. — 2006.
9. Patent US 8,472,674 B2. Method of seismic imaging using both reflecting and transmitted waves / N. Marmalyevskyy, Z. Gornyak, A. Kostyukevych, V. Mershchiy, Y. Roganov. — 2013.
10. Claerbout J. F. Fundamentals of geophysical data processing (with application to petroleum prospecting). — New York McGraw-Hill Book Co., Inc., 1976. — 274 p.
11. Амелин Н. Геология без границ: новые данные о региональной геологии Черного моря / Н. Амелин, М. Леончик, Е. Петров, Б. Сенин // Oil & Gas Journal Russia. — 2014. — № 12. — С. 44–49.
12. Black SeaSPAN [Электронный ресурс]. — Режим доступа: http://www.iongeo.com/content/documents/Resource%20Center/Brochures%20and%20Data%20Sheets/Data%20Sheets/Data%20Library/DS_GEO_Black_SeaSPAN.pdf (дата обращения: 28.08.2018).
13. Minshull T. A. Seismic Data Reveal Eastern Black Sea Basin Structure / T. A. Minshull, N. J. White, R. A. Edwards, D. J. Shillington, C. L. Scott, A. Demirer, M. Shaw-Champion, S. M. Jones, M. Erduran, T. Be-sevli, G. Coskun, K. Raven, A. Price, B. Peterson // Eos, Transactions American Geophysical Union. — 2005. — Vol. 86. — Is. 43. — Pp. 413–419. DOI: 10.1029/2005EO430001.
14. Scott C. L. Wide-angle seismic data reveal extensive overpressures in the Eastern Black Sea Basin / C. L. Scott, D. J. Shillington, T. A. Minshull, R. A. Edwards, P. J. Brown, N. J. White // Geophysical Journal International. — 2009. — Vol. 178. — Is. 2. — Pp. 1145–1163. DOI: 10.1111/j.1365-246X.2009.04215.x.

15. Shillington D. J. Cenozoic evolution of the eastern Black Sea: A test of depth-dependent stretching models / D. J. Shillington, N. White, T. A. Minshull, G. R. H. Edwards, S. M. Jones, R. A. Edwards, C. L. Scott // *Earth and Planetary Science Letters*. — 2008. — Vol. 265. — Is. 3–4. — Pp. 360–378. DOI: 10.1016/j.epsl.2007.10.033.

REFERENCES

1. Dmitrievskii, A. N., and B. M. Valyaev, eds. *Degazatsiya Zemli: geodinamika, geoflyuidy, neft', gaz i ikh paragenезis: Materialy Vse-rossiiskoi konferentsii, Moskva, 22–25 aprelya 2008 g.* M: GEOS, 2008.
2. Pavlenkova, Ninel Ivanovna. “The role of deep geophysical studies in the earth’s degassing and deep oil generation problem solution.” *Deep oil* 1.6 (2013): 811–824.
3. Ilinski, D. A., and E. B. Chirkov. “Innovation in exploration technologies for Russian shelf.” *RAO/CIS OFFSHORE 2011 PROCEEDINGS*. SPb.: Chimizdat, 2011. 150–156.
4. Ilinski, D. A., A. Y. Razumov, A. A. Korneev, A. M. Rusalina, and I. A. Gots. “Innovative approach and mobile technology of seismic surveying in tidal flats a hard-to-reach Arctic areas.” *Seismic Equipment* 49.2 (2013): 58–70.
5. Manoj Kumar Bhartee, and Karad Kapil. “Wide Angle Reflection-Refraction profiling (WARRP): “An effective tool for subsalt exploration” – A case study.” *10th Biennial International Conference & Exposition*. Kochin, 2013. 1–5.
6. Chandrasekhar, N., D. K. Panda, K. C. Das, P. Rajappan, and P. K. Bhowmick. “Challenges of Sub-basalt Mesozoic Exploration of Kerala Konkan offshore area and solutions through Long offset seismic & Sea Bed Node(SBN) data analysis.” *10th Biennial International Conference & Exposition*. Kochin, 2013. 1–5.
7. Levchenko, D. G., L. I. Lobkovskiy, D. A. Ilinski, I. B. Raushenbach, V. V. Ledenev, and K. A. Roginskiy. “Study case of development and field testing of multifunctional cable sea bottom seismic recorder.” *Seismic Equipment* 50.4 (2014): 23–35.
8. Marmalyevskyy, N., Z. Gorniyak, A. Kostyukevych, V. Mershchiiy, and Y. Roganov. Method, system and apparatus for interpreting seismic data using duplex waves. Patent US 7,110,323 B2. 2006.
9. Marmalyevskyy, N., Z. Gorniyak, A. Kostyukevych, V. Mershchiiy, and Y. Roganov. Method of seismic imaging using both reflecting and transmitted waves. Patent US 8,472,674 B2. 2013.
10. Claerbout, Jon F. *Fundamentals of geophysical data processing (with application to petroleum prospecting)*. New York McGraw-Hill Book Co., Inc., 1976.
11. Amelin, Nikolai, Mikhail Leonchik, Evgenii Petrov, and Boris Senin. “Geologiya bez granits: novye dannye o regional'noi geologii Chernogo morya.” *Oil & Gas Journal Russia* 12 (2014): 44–49.
12. Black SeaSPAN. Web. 28 Aug. 2018 http://www.iongeo.com/content/documents/Resource%20Center/Brochures%20and%20Data%20Sheets/Data%20Sheets/Data%20Library/DS_GEO_Black_SeaSPAN.pdf.
13. Minshull, T. A., N. J. White, R. A. Edwards, D. J. Shillington, C. L. Scott, A. Demirer, M. Shaw-Champion, S. M. Jones, M. Erduran, T. Besevli, G. Coskun, K. Raven, A. Price, and B. Peterson. “Seismic data reveal eastern Black Sea Basin structure.” *Eos, Transactions American Geophysical Union* 86.43 (2005): 413–419. DOI: 10.1029/2005EO430001.
14. Scott, C. L., D. J. Shillington, T. A. Minshull, R.A. Edwards, P. J. Brown, and N. J. White. “Wide-angle seismic data reveal extensive overpressures in the Eastern Black Sea Basin.” *Geophysical Journal International* 178.2 (2009): 1145–1163. DOI: 10.1111/j.1365-246X.2009.04215.x.
15. Shillington, Donna J., Nicky White, Timothy A. Minshull, Glyn R. H. Edwards, Stephen M. Jones, Rosemary A. Edwards, and Caroline L. Scott. “Cenozoic evolution of the eastern Black Sea: A test of depth-dependent stretching models.” *Earth and Planetary Science Letters* 265.3-4 (2008): 360–378. DOI: 10.1016/j.epsl.2007.10.033.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Ильинский Дмитрий Анатольевич —
 кандидат физико-математических наук,
 ведущий научный сотрудник
 Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН
 117997, Российская Федерация, г. Москва,
 Нахимовский проспект, д. 36
 e-mail: dilinski@ifz.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Ilinskiy, Dmitry A. —
 PhD, Senior Research Scientist
 Shirshov Institute of Oceanology Russian Academy
 of Sciences
 36, Nakhimovsky prospekt, Moscow, 117997,
 Russian Federation
 e-mail: dilinski@ifz.ru

Рогинский Константин Александрович —
кандидат технических наук,
ведущий научный сотрудник
Институт океанологии им. П. П. Ширшова РАН
117997, Российская Федерация, г. Москва,
Нахимовский проспект, 36
e-mail: roginskiy@list.ru

Ганжа Олег Юрьевич —
главный специалист
Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН
117997, Российская Федерация, г. Москва,
Нахимовский проспект, 36
e-mail: ganzhaoy@mail.ru

Roginskiy, Konstantin A. —
PhD, Senior Research Scientist
Shirshov Institute of Oceanology
Russian Academy of Sciences
36, Nakhimovsky prospekt, Moscow, 117997,
Russian Federation
e-mail: roginskiy@list.ru

Ganzha, Oleg Y. —
Chief Specialist
Shirshov Institute of Oceanology Russian Academy
of Sciences
36, Nakhimovsky prospekt, Moscow, 117997,
Russian Federation
e-mail: ganzhaoy@mail.ru

*Статья поступила в редакцию 10 сентября 2018 г.
Received: September 10, 2018.*

DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-5-951-959

THE RATIONALE FOR THE SELECTION OF QUANTITATIVE INDICATORS ZONES OF MANEUVERING IN THE WATER AREA OF THE NORTHERN SEA ROUTE

E. V. Andreeva, A. B. Afonin, A. L. Tezиков

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

The issues related to the assessment of safety of navigation of vessels in the waters of the Northern sea route are considered. It is noted that in the Arctic zone in recent years, large-scale projects related to the development of offshore fields, oil and sea transportation of hydrocarbons have been actively implemented. The results of the analysis of the impact of these projects on the conditions of Arctic shipping are presented. The necessity to develop methods for the evaluation of the navigation properties of the waters of the Northern sea route according to the criterion of safe manoeuvring of large vessels. The results of an analytical review of literature on the problems of navigation of ships in cramped conditions. The main directions of research carried out in this direction are established. It is noted that in almost all works the definition of the concept of "tightness of the water area" is given at a qualitative level, which makes it difficult to make an objective comparative assessment of water areas and their individual parts. The necessity of research aimed at the justification and development of methods that allow the navigation properties of maneuvering zones to describe a certain set of quantitative indicators. A description of the methods and sources of information, as well as the assumptions that were used in the justification and development of the method for determining quantitative indicators. Introduced and justified the concept of "measure of constraint" and "index of constraint" waters. Influence of the form and the sizes of the obstacles limiting zones of maneuvering on their quantitative indicators is established. The results of theoretical studies are confirmed by numerical simulation data and comparative quantitative estimates of maneuvering zones limited by obstacles of different sizes and shapes. The recommendations on the use of the developed method of quantitative assessment of maneuvering zones of ships are given. The direction of further research is determined.

Keywords: Northern sea route, maneuvering zones, large-capacity vessels, obstacles, quantitative indicators, modeling.

For citation:

Andreeva, Ekaterina V., Andrej B. Afonin, and Aleksandr L. Tezиков. "The rationale for the selection of quantitative indicators zones of maneuvering in the water area of the Northern sea route." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova* 10.5 (2018): 951–959. DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-5-951-959.

УДК 528.47

ОБОСНОВАНИЕ ВЫБОРА КОЛИЧЕСТВЕННЫХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ЗОН МАНЕВРИРОВАНИЯ В АКВАТОРИИ СЕВЕРНОГО МОРСКОГО ПУТИ

Е. В. Андреева, А. Б. Афонин, А. Л. Тезиков

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

Рассматриваются вопросы, связанные с оценкой безопасности плавания судов в акватории Северного морского пути. Отмечается, что в Арктической зоне в последние годы активно реализуются крупномасштабные проекты, связанные с обустройством шельфовых месторождений, бодычей и морской транспортной угледорогов. Приводятся результаты анализа влияния этих проектов на условия арктического судоходства. Обосновывается необходимость разработки методов оценки навигационных свойств акватории Северного морского пути по критерию безопасного маневрирования крупнотоннажных судов. Приведены результаты аналитического обзора литературных источников, посвященных проблемам плавания судов в стесненных условиях. Установлены основные направления исследований, проводимых в этом направлении. Отмечено, что практически во всех работах определение понятия «стесненность акватории» дается на ка-

чественном уровне, что затрудняет объективную сравнительную оценку акваторий и отдельных их частей. Обосновывается необходимость проведения исследований, направленных на обоснование и разработку методов, позволяющих описывать навигационные свойства зон маневрирования определенным набором количественных показателей. Приводится описание методов и источников информации, а также допущений, используемых при обосновании и разработке метода определения количественных показателей. Введены и обоснованы понятия «мера стесненности» и «показатель стесненности» акватории. Установлено влияние формы и размеров препятствий, ограничивающих зоны маневрирования, на их количественные показатели. Результаты теоретических исследований подтверждены данными численного моделирования и сравнительными количественными оценками зон маневрирования, ограниченных препятствиями, имеющими различные размеры и форму. Даны рекомендации по использованию разработанного метода количественных оценок зон маневрирования судов. Определено направление дальнейших исследований.

Ключевые слова: Северный морской путь, зоны маневрирования, крупнотоннажные суда, препятствия, количественные показатели, моделирование.

Для цитирования:

Андреева Е. В. Обоснование выбора количественных показателей зон маневрирования в акватории Северного морского пути / Е. В. Андреева, А. Б. Афонин, А. Л. Тезиков // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2018. — Т. 10. — № 5. — С. 951–959. DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-5-951-959.

Введение (Introduction)

Освоение Арктики, которое в значительной степени активизировалось в последнее время, требует переосмысления места и роли Северного морского пути (СМП) в этом процессе. Активизация деятельности в Арктике главным образом развивается по двум направлениям. Первое из них — разведка и освоение месторождений углеводородного сырья. Это направление определяется интенсивным масштабным развитием геологических изысканий на шельфе, которые в перспективе позволяют прогнозировать практически сплошное покрытие акватории СМП разрабатываемыми месторождениями (рис. 1) [1]. Второе направление — транспортное. В соответствии с ним планируется увеличение грузоперевозок по трассам СМП до 80 млн т к 2030 г. [2], что почти в восемь раз превышает объемы 2017 г. [3]. Реализация этих планов приведет и уже приводит к изменению условий и структуры флота, действующего в акватории СМП.

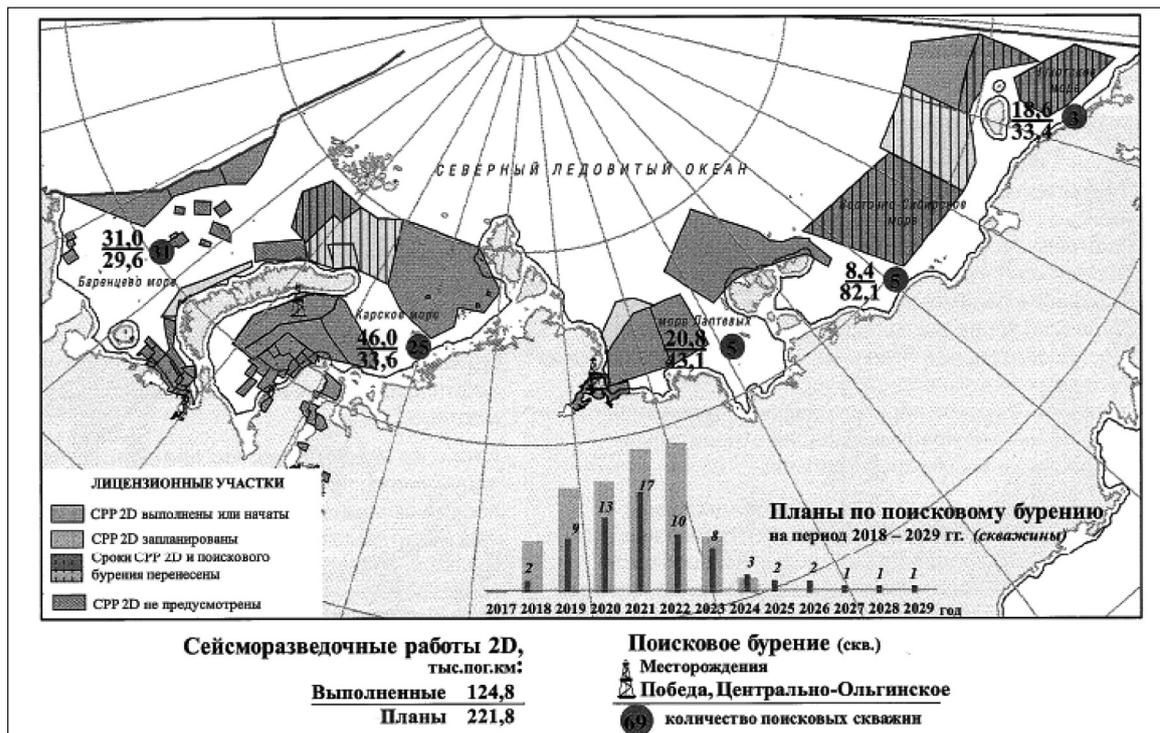


Рис. 1. Арктический шельф России: лицензионные обязательства (выполнение и планы)

Первым и наиболее заметным фактором, влияющим на изменение условий судоходства в будущем, является появление в акватории СМП значительного количества морских нефтегазопромысловых установок, которые служат объектами повышенной опасности. Судоходство в непосредственной близости от них требует принятия дополнительных решений по навигационно-гидрографическому обеспечению. Эти решения предполагают создание дополнительных зон разделения движения судов в районах, прилегающих к морским нефтегазопромысловым установкам, и дополнительных зон системы управления движением судов в непосредственной близости от них. Дополнительные зоны вокруг нефтегазопромысловых установок, возникающие в непосредственной близости от рекомендованных трасс СМП или охватывающие их, формируют дополнительные габаритные ограничения для движения судов, вывозящих углеводородное сырье, и для судов транзитного плавания.

Вторым фактором, изменяющим условия судоходства в акватории СМП, является использование крупнотоннажных судов с осадкой до 12–15 м. Суда больших размерений используются как для вывоза углеводородного сырья непосредственно с буровых или с терминалов заводов по сжижению природного газа, так и для транзитного плавания. Осадка 12–15 м затрудняет плавание крупногабаритных судов в мелководных и узких участках рекомендованных маршрутов СМП [4]. Эти обстоятельства, формирующие новые условия судоходства в акватории СМП в ближайшем будущем, требуют разработки методов оценки навигационных свойств акватории по критерию безопасного маневрирования крупнотоннажных судов. Полученные оценки для различных участков акватории СМП позволяют ее районировать и выработать комплекс дополнительных мероприятий, направленных на повышение уровня безопасности мореплавания в зависимости от степени ограниченности свободного маневрирования.

Согласно статистическим данным, число аварий судов в стесненных водах в десятки раз превышает число аварий в открытом море [5], [6]. По этой причине вопросам плавания судов в стесненных условиях уделяется большое внимание. Среди основных направлений исследований можно выделить следующие: влияние «человеческого фактора» на аварийность при плавании в стесненных условиях [6], [7]; совершенствование средств навигационного ограждения навигационных опасностей [8]; моделирование траекторий движения судов вблизи опасностей [9]–[11].

Обращает на себя внимание тот факт, что во всех указанных ранее работах определение понятия «стесненность акватории» дано на качественном уровне. Такой подход затрудняет объективную сравнительную оценку акваторий и их отдельных частей. Для преодоления этого недостатка в работе [12] предложено использовать количественные показатели стесненности акватории, основанные на методах теории геометрических вероятностей [13]. В работе [12] используются ненормированные безразмерные показатели стесненности акватории. Использование таких показателей нуждается в дополнительном обосновании.

Целью настоящей работы является обоснование выбора количественных показателей зон свободного маневрирования в акватории СМП, связанных с их фактическими размерами.

Методы и материалы (Methods and Materials)

В качестве источников информации о форме и размерах навигационных препятствий, влияющих на стесненность акватории СМП, использовались актуальные морские навигационные карты арктических морей, а также ледовые карты, размещенные на сайте Администрации СМП [3]. При проведении исследований принимались следующие допущения:

- к навигационным препятствиям могут относиться отмели, ледяные поля, запретные зоны и другие объекты;
- понятие «стесненность» относится только к области, расположенной между двумя ближайшими препятствиями, через которую предполагается проложить путь судна;
- все навигационные препятствия могут быть представлены в виде плоских простых геометрических фигур;

- форма, размеры и положение препятствий во времени не изменяются;
- частные характеристики судна, такие как его ширина, осадка, рыскание, радиус циркуляции и другие, не рассматриваются;
- путь судна может быть представлен в виде прямой линии или полосы, ширина которой характеризует границы свободного маневрирования судна.

Принятые допущения позволяют свести задачу об оценке стесненности акватории к задаче о пересечении прямых линий с плоскими геометрическими фигурами, решения которой рассматриваются в теории геометрических вероятностей [13].

В работе использованы следующие обозначения: S_t — показатель стесненности; M — мера стесненности; G — линия пути судна; b — ширина полосы движения судна; B — расстояние между препятствиями; Π — препятствие; l — ширина препятствия.

Результаты (Results)

Рассматривается схема взаимного расположения пути судна и двух препятствий Π_1 и Π_2 (рис. 2).

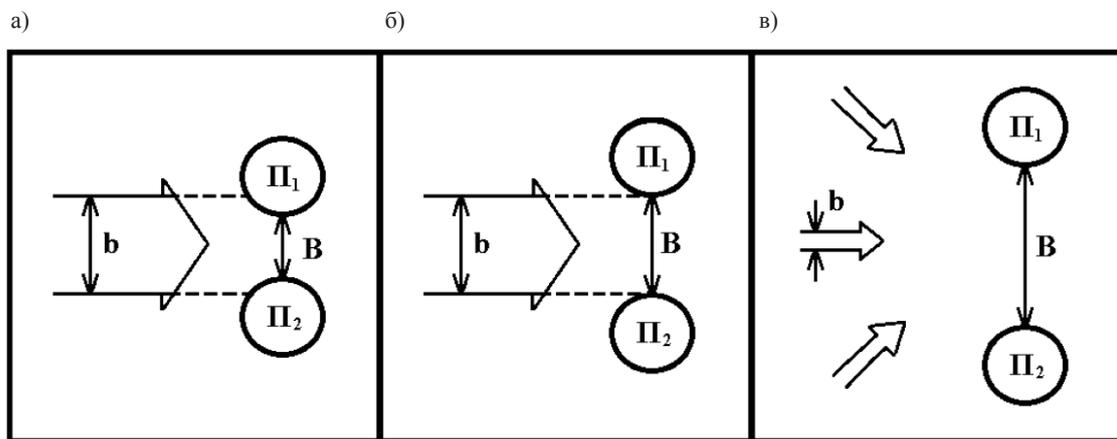


Рис. 2. Схемы взаимного расположения полосы движения судна и препятствий:
а — соответствует условию $b > B$; б — соответствует условию $b = B$;
в — соответствует условию $b \ll B$

Стесненность плавания зависит от соотношения ширины полосы движения судна b и ширины прохода между препятствиями, заданной расстоянием B . Если $b > B$, то показатель стесненности $S_t(b > B) > 1$, и проход между препятствиями невозможен (рис. 2, а). В случае, когда $S_t(b = B) = 1$ (рис. 2, б), движение судна между препятствиями крайне стеснено, так как для прохода судна положение линии его пути должно точно совпадать с осью прохода. По мере увеличения ширины прохода относительно ширины полосы движения судна, показатель стесненности акватории уменьшается. При этом линии безопасного пути судна могут отклоняться от оси прохода как по направлению, так и по положению. Если $b \ll B$, то $S_t(b \ll B) \rightarrow 0$ (рис. 2, в) и между препятствиями Π_1 и Π_2 имеется большое свободное пространство, которое не стесняет судно в свободе маневрирования.

Вместе с тем этот параметр оказывается нечувствительным к форме и размерам препятствий. На рис. 3–6 показаны препятствия с одной и той же шириной прохода B , но отличающиеся друг от друга по форме и размерам. На рис. 3 и 4 приведены схемы с препятствиями, имеющими разную ширину. Анализ схем показывает, что при увеличении ширины препятствий стесненность акватории увеличивается. При увеличении l от 0 (см. рис. 3, а) до l_1 (см. рис. 3, б), а также от l_1 (см. рис. 4, а) до l_2 (см. рис. 4, б) происходит сокращение диапазона курсов, соответствующих безопасному проходу судна между препятствиями. На рис. 5 и 6 приведены схемы с препятствиями Π_1 и Π_2 , имеющими разную форму.

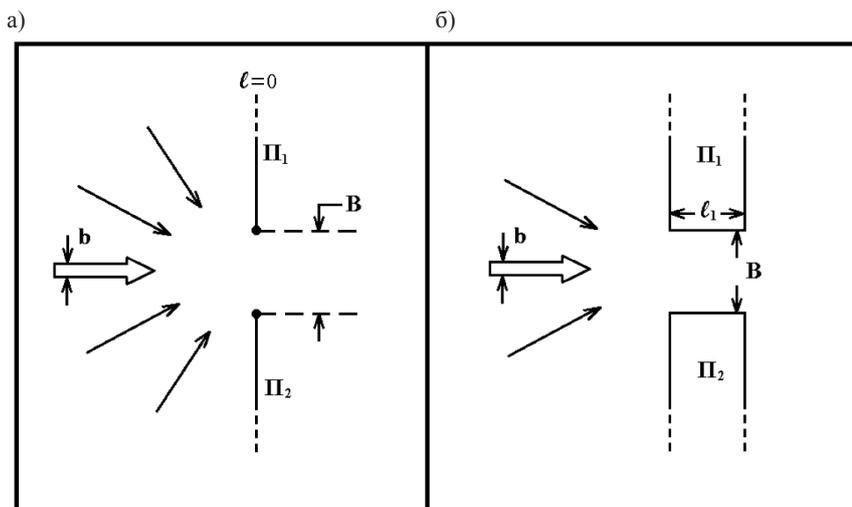


Рис. 3. Схемы препятствий, имеющих разную ширину:
 а — соответствует условию $l = 0$; б — соответствует условию $l_1 > 0$

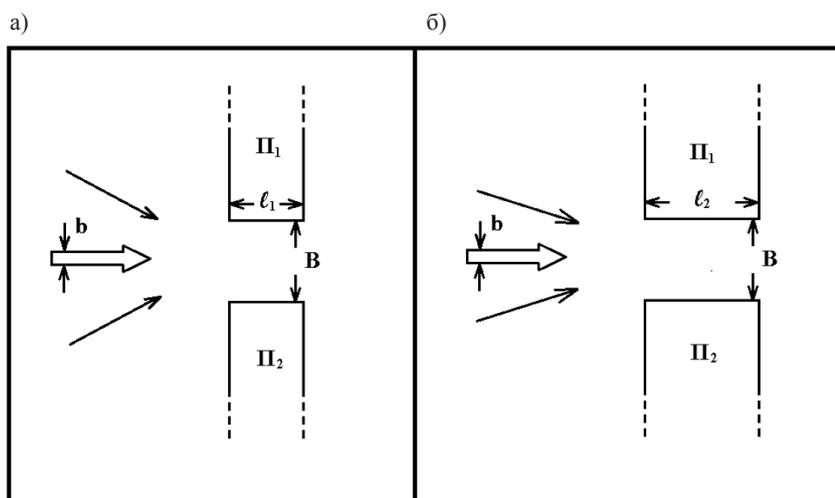


Рис. 4. Схемы препятствий, имеющих разную ширину:
 а — соответствует условию $l_1 > 0$; б — соответствует условию $l_2 > l_1$

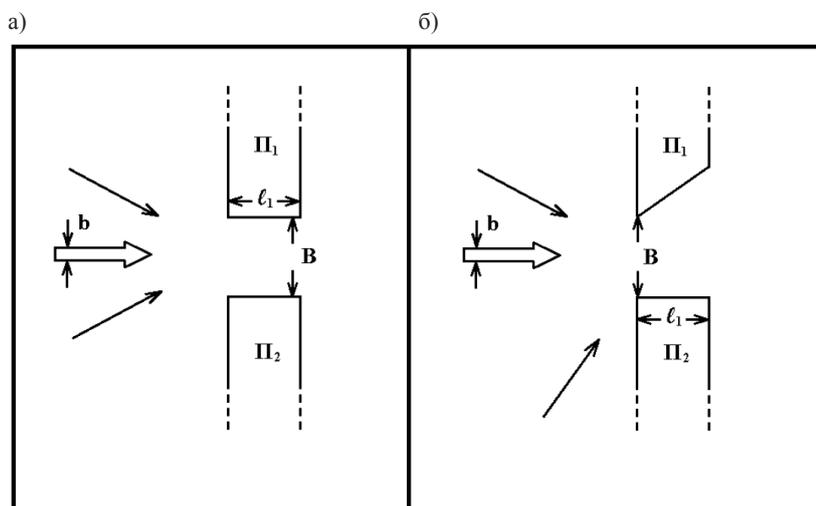


Рис. 5. Схемы препятствий, имеющих разную форму:
 а — ширина и форма препятствий одинаковые; б — форма препятствий разная

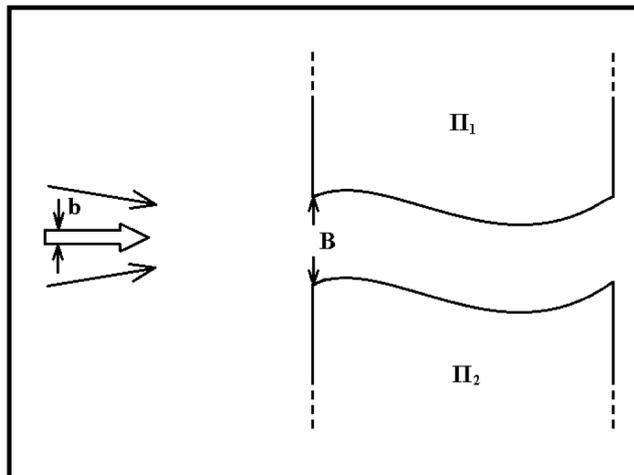


Рис. 6. Схема криволинейного прохода, ограниченного препятствиями с одинаковой формой и шириной

Анализ схем позволяет отметить, что изменение формы препятствий может приводить как к уменьшению стесненности акватории (сравнение схем, приведенных на рис. 5, а и рис. 5, б), так и к ее увеличению (сравнение схем, приведенных на рис. 5, а и рис. 6). Взаимное сравнение схем, приведенных на рис. 2–6, позволяет на качественном уровне выполнять сравнение стесненности зон маневрирования, расположенных между препятствиями Π_1 и Π_2 . При этом использовался прием, при котором сравнение маневренных зон во всех случаях производилось по отношению только одного изменяемого параметра, к которому относились либо ширина прохода B (см. рис. 2), либо ширина препятствий l (см. рис. 3 и 4), либо форма препятствий (см. рис. 5 и 6).

В качестве количественной оценки стесненности зоны свободного маневрирования предлагается использовать меру стесненности [12], рассчитываемую по формуле

$$M = \int_{\Pi_1, \Pi_2} f(G, B) dp d\varphi, \quad (1)$$

где $f(G, B)$ — функция, описывающая пересечение линии пути судна с линией, соединяющей препятствия Π_1 и Π_2 ; p и φ — линейные и угловые параметры точек пересечения пути судна с линией B .

В выражении (1) переменная p соответствует расстоянию от препятствия Π_1 до препятствия Π_2 по направлению линии B ($0 \leq p \leq B$). Угловой параметр φ соответствует углу между линиями B и G при условии, что линия G не пересекает препятствия Π_1 и Π_2 ни в одной точке.

В соответствии с выражением (1) оказывается, что мера стесненности зоны свободного маневрирования, показанная рис. 3, а, равна ширине свободного прохода между двумя линейными препятствиями

$$M(l_{\Pi_1} = 0; l_{\Pi_2} = 0) = B. \quad (2)$$

При увеличении ширины препятствий l значение меры (1) уменьшается:

$$M(l_{\Pi_1} \neq 0; l_{\Pi_2} \neq 0) = B^* < M(l_{\Pi_1} = 0; l_{\Pi_2} = 0) = B. \quad (3)$$

Для препятствий, имеющих одинаковую ширину $l_{\Pi_1} = l_{\Pi_2} = kB$, получены следующие значения меры стесненности:

$$M(l_{\Pi_1} = 0,5B; l_{\Pi_2} = 0,5B) = 0,62 B; \quad (4)$$

$$M(l_{\Pi_1} = 1B; l_{\Pi_2} = 1B) = 0,41 B; \quad (5)$$

$$M(l_{\Pi_1} = 2B; l_{\Pi_2} = 2B) = 0,24 B. \quad (6)$$

Оценки (2), (4)–(6) показывают, что при одной и той же ширине прохода между препятствиями B увеличение ширины препятствий l_{II} приводит к уменьшению безопасной ширины прохода, а, следовательно, к увеличению стесненности зоны свободного маневрирования, расположенной между препятствиями.

В соответствии с изменением меры стесненности меняется и показатель стесненности акватории:

$$S_r(l_{II_1} = 0; l_{II_2} = 0) = \frac{b}{B}; \quad (7)$$

$$S_r(l_{II_1} = 0,5B; l_{II_2} = 0,5B) = 1,61 \frac{b}{B}; \quad (8)$$

$$S_r(l_{II_1} = B; l_{II_2} = B) = 2,44 \frac{b}{B}; \quad (9)$$

$$S_r(l_{II_1} = 2B; l_{II_2} = 2B) = 4,17 \frac{b}{B}. \quad (10)$$

Таким образом, при увеличении ширины препятствий от 0 до $2B$ показатель стесненности зоны свободного маневрирования увеличивается примерно в четыре раза.

Обсуждение (Discussion)

Предложенные количественные показатели позволяют учитывать форму, размеры, а также взаимное расположение препятствий, ограничивающих зону свободного маневрирования. Решение уравнения (1) может выполняться методами численного интегрирования с использованием контуров препятствий, снятых с морских навигационных и ледовых карт. Принятые в работе допущения и ограничения не влияют на практическую значимость полученных результатов.

Метод использован для оценки навигационных свойств акватории, ограниченной двумя препятствиями. При наличии большего числа препятствий оценка зон свободного маневрирования производится поэтапно. На первом этапе выполняются частные оценки для каждой пары ближайших друг к другу препятствий. На втором этапе выполняется комплексная оценка зоны свободного маневрирования для всего маршрута.

Заключение (Conclusion)

В работе обоснован выбор количественных показателей зон свободного маневрирования морских судов. Данный метод предполагается использовать для оценки навигационных свойств акватории СМП в различные навигационные периоды. В перспективе он может быть использован для формирования в геоинформационных системах динамических тематических слоев, показывающих распределение зон свободного маневрирования в акватории СМП на заданный момент времени. В дальнейшем планируется исследовать в динамике процесс изменения показателей стесненности акватории СМП в зависимости от навигационного периода.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Каминский В. Д. Основные проблемы и пути освоения углеводородных ресурсов на шельфе Арктической зоны Российской Федерации / В. Д. Каминский [и др.] // Нефтегаз. — 2018. — № 9. — С. 44–46.
2. Послание Президента Федеральному Собранию 1 марта 2018. [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <http://kremlin.ru/events/president/news/56957> (дата обращения: 10.09.2018).
3. Сайт Администрации Северного морского пути. [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <http://www.nsra.ru/ru/glavnaya/novosti/n19.html> (дата обращения: 26.08.2018).

4. *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.
5. *Снопков В. И.* Управление судном / В. И. Снопков. — СПб: АНО НПО «Профессионал», 2004. — 536 с.
6. *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.
7. *Рябченко Р. Б.* Идентификация промахов, обеспечивающих безопасность плавания в стесненных водах / Р. Б. Рябченко, В. В. Шутов, В. И. Меньшиков // *Эксплуатация морского транспорта*. — 2010. — № 3 (61). — С. 38–40.
8. *Черная Е. А.* Информационные аспекты плавания судна по заданной траектории / Е. А. Черная // *Специальные транспортные технологии и инфраструктура: межвуз. сборник науч. трудов*. — 2000. — № 4. — С. 33–40.
9. *Сазонов А. Е.* Прогнозирование траектории движения судна при помощи нейронной сети / А. Е. Сазонов, В. В. Дерябин // *Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова*. — 2013. — № 3 (22). — С. 6–13.
10. *Некрасов С. Н.* Оценка и прогнозирование опасных навигационных ситуаций / С. Н. Некрасов, И. В. Капустин, М. С. Старов // *Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова*. — 2013. — № 2. — С. 98–100.
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. *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.
13. *Сантало Л.* Интегральная геометрия и геометрические вероятности / Л. Сантало. — М.: Наука, 1983. — 358 с.

REFERENCES

1. Kaminskii, V. D., O. I. Supronenko, T. Yu. Medvedeva, and A. A. Chernykh. “Osnovnye problemy i puti osvoeniya uglevodorodnykh resursov na shel’fe Arkticheskoi zony Rossiiskoi Federatsii.” *Neftegaz* 9 (2018): 44–46.
2. Poslanie Prezidenta Federal’nomu Sobraniyu 1 marta 2018. Web. 10 Sept. 2018 <<http://kremlin.ru/events/president/news/56957>>.
3. Federal State Budgetary Institution The Northern Sea Route Administration. Web. 26 Aug. 2018 <<http://www.nsra.ru/en/glavnaya/novosti/n19.html>>.
4. Tezиков, 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.
5. Snopkov, V. I. *Upravlenie sudnom*. SPb: ANO NPO «Professional», 2004.
6. Men’shikov, V. I., A. N. Suslov, and V.V. . Shutov. *Problemy bezopasnogo moreplavaniya v slozhnykh navigatsionnykh usloviyakh stesnennykh vod*. Murmansk: Izd. MGTU, 2013.
7. Ryabchenko, R. B., V. V. Shutov, and V. I. Menshikov. “Identification of near misses providing safety of the navigation in congested waters.” *Ekspluatatsiya morskogo transporta* 3(61) (2010): 38–40.
8. Chernaya, E. A. “Informatsionnye aspekty plavaniya sudna po zadannoi traektorii.” *Spetsial’nye transportnye tekhnologii i infrastruktura: Mezhvuzovskii sbornik nauchnykh trudov* 4 (2000): 33–40.
9. Sazonov, A. E., and V. V. Deryabin. “Forecasting to paths of the motion ship with the help of neyronnoy network.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova* 3(22) (2013): 6–13.
10. Nekrasov, S. N., I. V. Kapustin, and M. S. Starov. “Assessment and prediction of dangerous navigational situations.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 2 (2013): 98–100.
11. Olhovik, Evgeniy O., Andrej B. Afonin, and Aleksandr L. Tezиков. “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. 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.

13. Santalo, L. *Integral'naya geometriya i geometricheskie veroyatnosti*. M.: Nauka, 1983.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Андреева Екатерина Валерьевна — ассистент
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала
С. О. Макарова»
198035, Российская Федерация, Санкт-Петербург,
ул. Двинская, 5/7
e-mail: kaf_geo@gumrf.ru

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

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

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Andreeva, Ekaterina V. — assistant
Admiral Makarov State University of Maritime
and Inland Shipping
5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg, 198035,
Russian Federation
e-mail: kaf_geo@gumrf.ru

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

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

*Статья поступила в редакцию 17 сентября 2018 г.
Received: September 17, 2018.*

STRESS-DEFORMED CONDITION OF THE MARINE DRILLING PLATFORM ON THE SHELF OF THE CASPIAN SEA

T. T. Sultanov, G. M. Tlepiyeva

Eurasian National University named after LN Gumilev,
Astana, Republic of Kazakhstan

Modern spatial structures in the process of work are subject to various force effects, therefore, their structural elements are in a complex stress-strain state, and individual nodes go into the plastic deformation stage, which has a significant impact on the accuracy of calculations. Definition of kinematic and power factors in each node element structures depending on the mechanical and geometrical characteristics of the materials and the quantities and types of external forces, for the purpose of optimal parameters destination constructions is problematic task of structural mechanics and elasticity. The dimensional structures under consideration are divided into final elements that interact with each other at the nodes. All nodes are numbered with indication of the beginning and end of each final element. The design refers to the global coordinate system OXYZ, where the global coordinate system coincides with the coordinate system of the ground solid. A small-layered base with rigidly coupled inclined layers near the structure is modeled by an elastic anisotropic body with an isotropic plane inclined to the horizon at an arbitrary angle and coinciding with the bedding plane of the layers. The equations of the generalized Hooke's law with respect to the Cartesian coordinate system OXYZ are derived, the OZ-axis is directed vertically upward, the axes OX and OY-horizontally. Defined deformation coefficients and modules of elasticity as a function of the elastic constants and the five angles of inclination of the plane of isotropy and structural axes of the line deflection stretch plane of isotropy.

Keywords: offshore drilling platform, offshore base, Caspian Sea, core elements, shelf.

For citation:

Sultanov, Timur T., and Gulnar M. Tlepiyeva “Stress-deformed condition of the marine drilling platform on the shelf of the Caspian Sea.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova* 10.5 (2018): 960–974. DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-5-960-974.

УДК 624.042.1

НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОЕ СОСТОЯНИЕ МОРСКИХ БУРОВЫХ ПЛАТФОРМ НА ШЕЛЬФЕ КАСПИЙСКОГО МОРЯ

Т. Т. Султанов, Г. М. Тлепиева

Евразийский национальный университет имени Л. Н. Гумилёва,
Астана, Республика Казахстан

Современные пространственные сооружения в процессе работы подвержены различным силовым воздействиям, поэтому их конструктивные элементы находятся в сложном напряженно-деформированном состоянии, и отдельные узлы переходят в стадию пластического деформирования, что оказывает существенное влияние на точность расчетов. Определение кинематических и силовых факторов в каждом узловом элементе сооружений в зависимости от физико-механических и геометрических характеристик материалов, а также от величин и вида внешних усилий с целью назначения оптимальных параметров конструкций является проблемной задачей строительной механики и теории упругости. Рассматриваемые пространственные конструкции разбиваются на конечные элементы, взаимодействующие между собой в узлах. Все узлы нумеруются с указанием начала и конца каждого конечного элемента. Конструкция относится к глобальной системе координат OXYZ, причем глобальная система координат совпадает с системой координат грунтового массива. Мелкослоистое морское основание с жестко сцепленными наклонными слоями вблизи морского сооружения моделируется упругим анизотропным телом с плоскостью изотропии, наклоненной к горизонту под произвольным углом и совпадающей с плоскостью напластования слоев. Выводятся уравнения обобщенного закона Гука относительно декартовой системы координат OXYZ, ось OZ направлена вертикально вверх, оси OX и OY — горизонтально. Определяются коэффициенты деформа-

ции и модули упругости в виде функций от пяти упругих постоянных углов наклона плоскости изотропии и отклонения оси конструкции от линии простираения плоскости изотропии.

Ключевые слова: морская буровая платформа, морское основание, Каспийское море, стержневые элементы, шельф.

Для цитирования:

Султанов Т. Т. Напряженно-деформированное состояние морских буровых платформ на шельфе Каспийского моря / Т. Т. Султанов, Г. М. Тлепиева // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2018. — Т. 10. — № 5. — С. 960–974. DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-5-960-974.

Введение (Introduction)

В предлагаемой публикации рассматривается статическая задача о напряженном и деформированном состоянии системы «конструкции морская буровая платформа – морское основание» от действия вертикальных и горизонтальных нагрузок, действующих на сооружение. Излагаются разработанные алгоритмы решения статических задач методом конечных элементов с привлечением одно- и трехмерных конечных элементов и описывается методика составления разрешающих линейных алгебраических уравнений исследуемого объекта.

Геологические и лабораторные данные исследований дна Каспийского моря позволяют сделать вывод о том, что морские отложения являются трансверсально-изотропным наклонно-слоистым массивом, сформированным тремя плоскопараллельными слоями. Рассматриваемая область мысленно делится на систему прямоугольных параллелепипедов — элементов, контактирующих в узлах. Для параллелепипеда аппроксимирующие функции введем из условия, что перемещения в узлах распределяются по линейному закону независимо друг от друга [1], [2]. При расчетах массивных тел в методе конечных элементов используются зависимости для трехмерного напряженного состояния. Построение матрицы жесткости элемента может быть выполнено по следующей схеме: поле перемещений по области конечного элемента назначается как функция перемещений узлов; деформации в области конечных элементов выражаются через перемещения (соотношение Коши); напряжения в области конечных элементов выражаются через деформации (обобщенный закон Гука); на основе принципа возможных перемещений определяются жесткостные характеристики.

Пространственная конструкция морской буровой платформы, состоящая из упругих звеньев, разбивается на системы прямых стержневых и плоских элементов, соединенных жестко в узловых точках, которые последовательно пронумерованы. Кроме неподвижной глобальной системы координат рассматривается локальная система координат каждого стержня. Координаты узлов задаются. Допускается, что внешние силы известны, и действие внешних сил происходит в узлах. Перемещение любой точки элемента определяется формулами функций-форм [3].

При проектировании морской буровой платформы наибольшее внимание уделяется расчету на волновые нагрузки, основанные на теории регулярных и нерегулярных волн. До сих пор применявшиеся методы классической гидродинамики не учитывают случайный характер морского волнения. Для учета случайных процессов и полей предложен ряд аналитических аппроксимаций частотного спектра волн, которые демонстрируют развитое морское волнение в виде стационарного эргодического процесса. Для учета случайных процессов и полей был предложен ряд аналитических аппроксимаций частотного спектра волн: спектры Пирсона – Мошковица, Неймана, Стрекалова, Крылова, Бретшнайдера, Давидана, Джонсона.

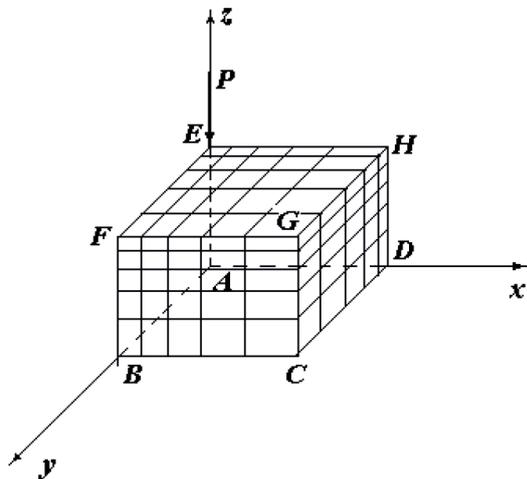
Теоретический метод исследования (Theoretical Method of Research)

Расчет морских буровых платформ на статические нагрузки. Применение метода конечных элементов предполагает конечность размеров расчетной области вблизи морской буровой платформы типа «на сваях» в отличие от способа определения размеров породного массива вокруг сооружения при действии различных нагрузок (выбор способа зависит от размеров сооружения). С целью выбора размеров расчетной области, а также для проверки правильности разработанного алгоритма были проведены расчеты тестовой задачи на действие сосредоточенных нагрузок

на полупространство, которое было разбито на переменное количество призматических элементов с вариацией количества узлов в широком диапазоне: от 200 до 4000 узлов. Достоверность построенного алгоритма расчета расчетной области и расчетного объекта была протестирована отдельно на примере решения задачи о статическом упругом напряженном состоянии изотропного полупространства с упругими характеристиками: $E = 10^6$ МПа, $\nu = 0,2$ под действием вертикальной сосредоточенной силы $P = 392$ кН на верхней границе (задача Буссинеска) и пространственной стержневой системы (задача Добровольского), для которых существует аналитическое решение.

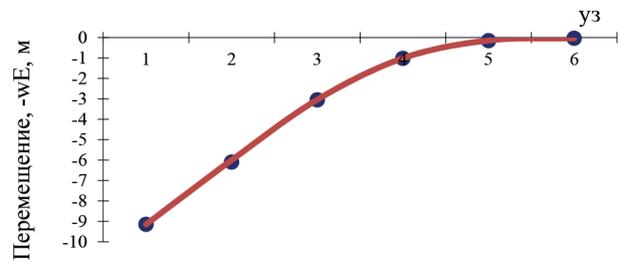
На рис. 1 (б)–(г) приведены значения перемещений, полученных аналитическим методом и методом конечных элементов. Как видно, использование призматических конечных элементов и стержневых элементов дает довольно точные значения перемещений, отклоняющихся от аналитических значений не более чем на 0,5 %. При этом следует отметить, что разбиение было достаточно грубым. Таким образом, предлагаемая расчетная область для изучения как статического, так и динамического поведения представляет собой четырехугольное полупространство с жестко закрепленными боковыми поверхностями с размерами, превышающими размеры основания морской буровой платформы примерно на 10 м.

а)

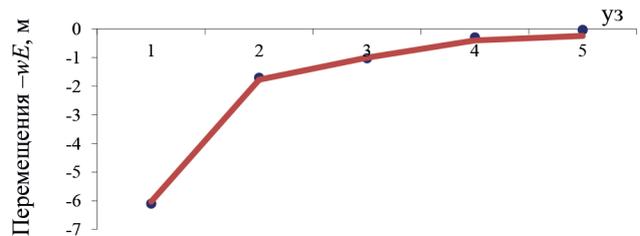


Граничные условия: $u = v = w = 0$
на $ABCD$ ($u = 0$), на $AEHD$ ($v = 0$), на $AEFB$,
все другие границы свободны

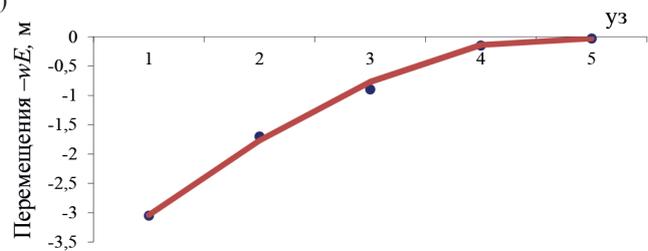
б)



в)



г)



• вычисленные значения — точное значение

Рис. 1. Тестовая задача Буссинеска — пример исследования трехмерного напряженного состояния:

а — расчетная схема; б — эпюра вертикальных перемещений при $z = -15$ см;

в — эпюра вертикальных перемещений при $z = -53,5$ см;

г — эпюра вертикальных перемещений при $z = -114$ см

В табл. 1 приведены значения пяти значений упругих постоянных и параметров анизотропии, выявленных для сухих и влажных осадочных горных пород шельфа казахстанского сектора восточной части Каспийского моря и прибрежных зон. Сравнение значений упругих постоянных показывает, что увеличение влажности оказывает значительное влияние на прочностные характеристики, уменьшая их почти в 1,7 раза, но даже при различных влажных состояниях осадочные горные породы основания Каспийского моря обладают ярко выраженной анизотропией [4].

В дальнейшем в расчетах принимаются следующие допущения:

- в первом приближении массивная платформенная плита заменяется эквивалентной стержневой системой с характеристиками, соответствующей плите;
- нижняя опорная часть представляется в виде конечно-элементной системы с безынерционными элементами типа стержней (масса системы сосредотачивается в узловых точках);
- сооружение подвергается воздействию статической нагрузке от веса технологического оборудования и морского течения (течение предполагается установившимся с постоянной скоростью и некоррелированным волновым движением).

Таблица 1

Механические и геометрические параметры расчетной области и расчетного объекта

№ п/п.	Механические параметры	Единица измерения	Значение
Расчетный объект			
1	Сталь	Модуль упругости	кг/см ²
		Коэффициент Пуассона	–
Расчетная область			
2	Верхней чехол — транстропный морской массив с естественной влажностью 13 %	Модуль упругости	кг/см ²
		Модуль упругости	кг/см ²
		Модуль сдвига	кг/см ²
		Коэффициент Пуассона	–
		Коэффициент Пуассона	–
3	Транстропный морской массив с естественной влажностью 5 %	Модуль упругости	кг/см ²
		Модуль упругости	кг/см ²
		Модуль сдвига	кг/см ²
		Коэффициент Пуассона	–
		Коэффициент Пуассона	–
4	Транстропный морской массив с естественной влажностью 0,6 %	Модуль упругости	кг/см ²
		Модуль упругости	кг/см ²
		Модуль сдвига	кг/см ²
		Коэффициент Пуассона	–
		Коэффициент Пуассона	–

На рис. 2, а показана реально существующая конструкция морской буровой платформы на заземленных стальных основаниях шести опор, соединенных между собой раскосами, которые естественным образом разбиты на стержневые элементы. Во всех верхних узлах платформенной плиты действуют силы в зависимости от веса технологического оборудования и собственного веса по оси Z. На основании изложенного алгоритма расчета пространственной конструкции морской буровой платформы, состоящей из одно- и двумерных элементов, а также основания, состоящего из элементов в виде параллелепипеда, находящихся в равновесии под действием статических сил и моментов, составлена программа. В соответствии с методом конечных элементов морская буровая платформа разбита на 177 элементов, соединенных в 84 узлах, расчетные стержневые элементы изготовлены из стали с упругими физико-механическими характеристиками, приведенными в табл. 1.

При расчете пространственной конструкции морской буровой платформы были учтены следующие граничные условия:

- все узлы конструкций имеют жесткие соединения;
- конструкция верхней плитной части опирается на шесть жестких опор;

– в местах соединения с основанием в узлах конструкции отсутствуют углы поворота, но имеются перемещения (перемещение поверхности морского основания принимается равным перемещению в опорной части базы основания платформы), т. е. выполняется условие совместности работы системы [5].

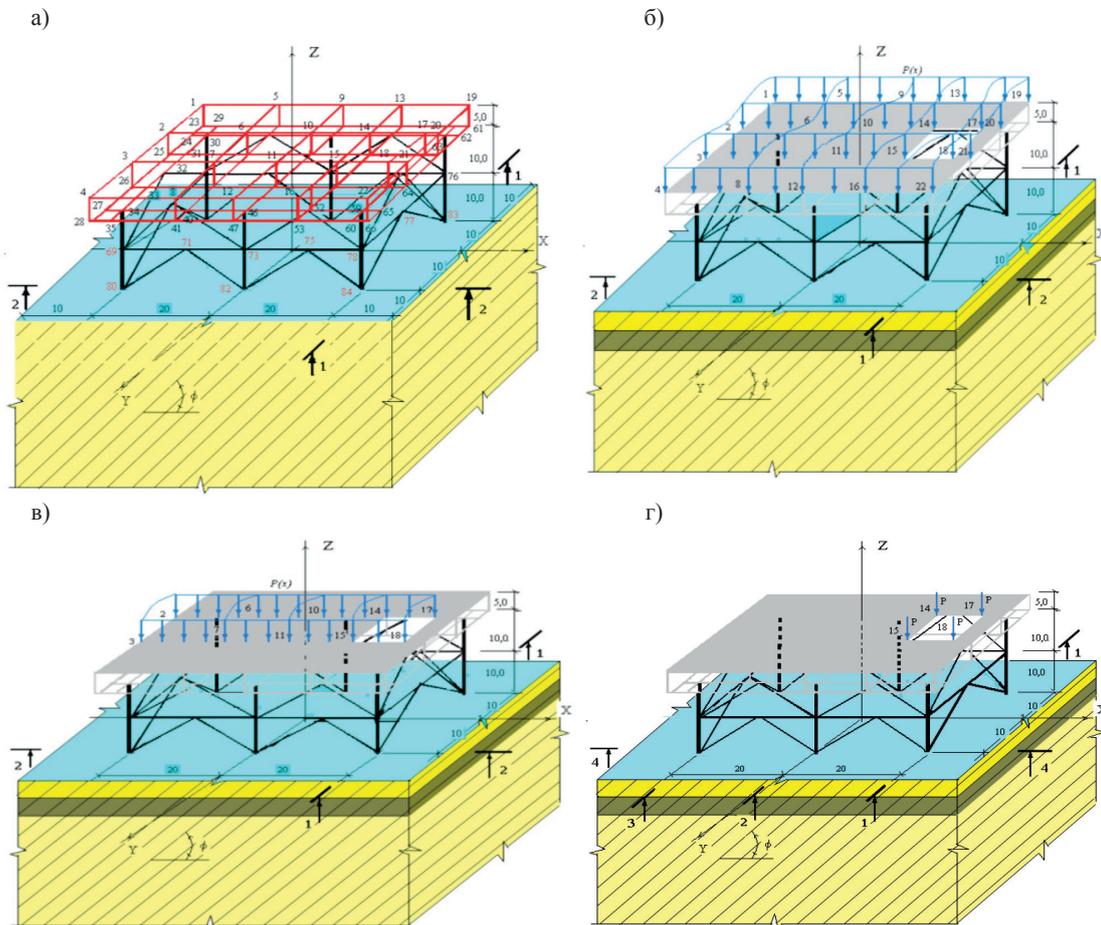


Рис. 2. Структурная схема расчетной области и расчетного объекта:
 а — разбивка конструкции буровой платформы на конечные элементы;
 б — разбивка конструкции с произвольными внешними усилиями по всей верхней плите;
 в — разбивка конструкции с произвольными полосовыми внешними усилиями;
 г — разбивка конструкции с сосредоточенными внешними усилиями на месте установки буровой вышки

Результаты (Results)

Для реализации составленного алгоритма и программы выполняется расчет напряженно-деформированного состояния конструкций морской буровой платформы на слоистом морском основании. В качестве расчетной области рассматривается конструкция морской буровой платформы, опирающаяся шестью опорами на слоистое морское основание.

Конструкция морской буровой платформы заменяется эквивалентной стержневой системой, состоящей из 177 элементов, соединенных в 84 узлах (основание разбито на 4000 призматических элементов с общим количеством узлов 3249). Размеры нижнего полупространства приняты исходя из исключения влияния граничных условий на напряженно-деформированное состояние как сооружения, так и морского основания [6]. В местах соединения опор и слоистого основания ввиду малости углы поворота приняты равными нулю. Боковые грани расчетной области считаются жесткими (недеформируемыми) — см. рис. 2, а.

Морское основание слоистое, горные породы верхнего чехла до глубины 1 м имеют влажность 13 %, средняя часть — 5 %, коренные породы — 0,6 %. Конструкция морской буровой платформы выполнена из металла с упругими характеристиками. Для полноты сравнения напряженно-дефор-

мированного состояния конструкции морской платформы и ее основания выполнен расчет различных влажных горных пород, составляющих основание, причем естественная влажность с увеличением глубины залегания уменьшается. Для наглядности в табл. 1 введены механические и геометрические параметры пространственных значений расчетной области и объекта. Выполнены массовые и многовариантные расчеты для изучения статического упругого напряженного состояния морской буровой платформы и морского основания. Рассматриваемые внешние нагрузки действуют в следующих сочетаниях: по всей поверхности платформы (рис. 2, б), по полосе в средней части платформы (рис. 2, в), а также в местах установки буровой вышки (рис. 2, г).

Рассмотрим начальное упругое и упруго-ползучее напряженно-деформированные состояния системы «морская буровая платформа – анизотропное основание», находящейся под действием распределенной нагрузки по всей верхней плите платформы (см. рис. 2, б).

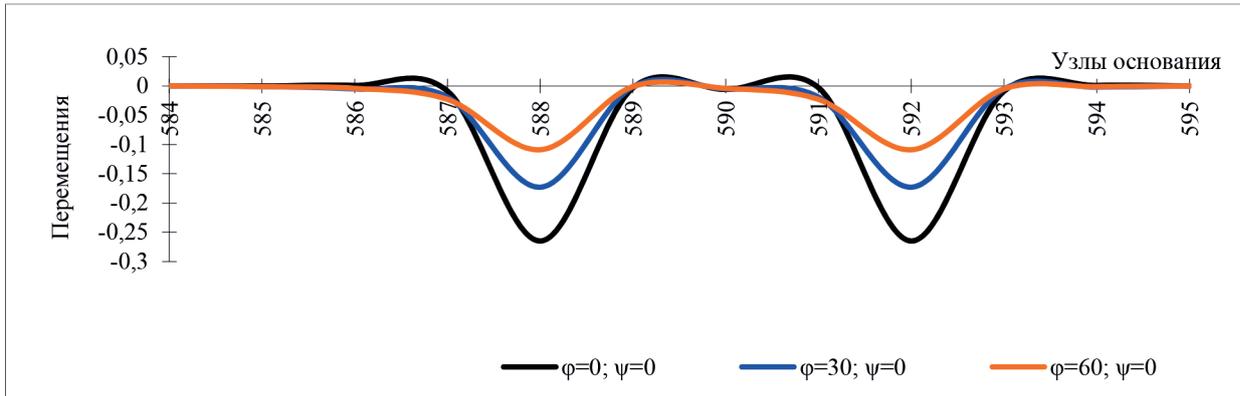
На рис. 3 показаны эпюры упругих перемещений w на границе изучаемого области, а в табл. 2 приведены значения упругих перемещений изучаемого объекта с течением времени. Величина угла падения плоскости изотропии оказывает существенное влияние на характер распределения перемещений: с ростом угла падения плоскости слоев пород φ вертикальные перемещения значительно уменьшаются, при этом угол отклонения оси сооружения линии простирания плоскости изотропии не оказывает влияния на характер перемещений, сказывается удаленность опор друг от друга. При любом угле падения плоскости изотропии слоистых пород величины перемещений почти в три раза больше, чем соответствующие перемещения в изотропном упругом основании.

Таблица 2

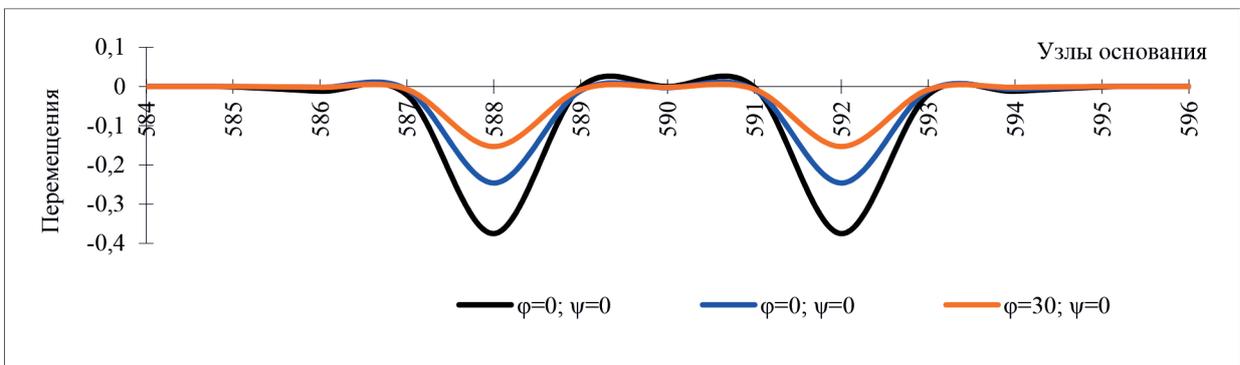
Значения упругих перемещений конструкций морской буровой платформы в зависимости от угла наклона φ с учетом ползучести морского основания $10^{-6} \cdot P$ при действии внешних сил на верхнюю плитную часть платформы

Номер узла	Перемещения с учетом фактора времени и угла наклона плоскости изотропии, град.									
	$t = 0$			$t = 120$			$t = 600$			
	$\varphi = 0$	$\varphi = 30$	$\varphi = 60$	$\varphi = 0$	$\varphi = 30$	$\varphi = 60$	$\varphi = 0$	$\varphi = 30$	$\varphi = 60$	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
Верхняя плитная часть	3	-2,627	-1,896	-1,367	-3,635	-2,629	-1,897	-5,027	-3,632	-2,625
	4	0,098	0,070	0,050	0,137	0,099	0,072	0,191	0,135	0,096
	7	2,873	2,136	1,588	3,868	2,875	2,138	5,210	3,865	2,871
	8	1,374	0,981	0,699	1,918	1,377	0,984	2,673	1,914	1,372
	11	0,426	0,333	0,261	0,546	0,428	0,335	0,703	0,542	0,423
	12	0,106	0,087	0,072	0,129	0,108	0,089	0,159	0,125	0,104
	15	-13,43	-10,14	-7,667	-17,80	-13,43	-10,14	-23,62	-17,80	-13,43
	16	1,073	0,802	0,600	1,435	1,074	0,805	1,918	1,431	1,071
	21	-0,099	-0,048	-0,017	-0,181	-0,101	-0,049	-0,309	-0,180	-0,097
	22	-0,239	-0,180	-0,136	-0,317	-0,241	-0,183	-0,420	-0,315	-0,236
	26	-0,712	-0,556	-0,434	-0,908	-0,714	-0,558	-1,157	-0,907	-0,709
	27	-4,028	-2,909	-2,099	-5,572	-4,029	-2,911	-7,704	-5,571	-4,026
	28	0,278	0,198	0,141	0,388	0,279	0,201	0,541	0,385	0,276
	32	-0,025	-0,013	-0,005	-0,044	-0,027	-0,015	-0,072	-0,041	-0,023
33	-0,013	-0,016	-0,017	-0,007	-0,015	-0,017	0,007	-0,009	-0,011	
34	0,050	0,036	0,027	0,067	0,052	0,037	0,091	0,069	0,048	
35	0,083	0,061	0,045	0,113	0,087	0,064	0,154	0,115	0,081	
39	-0,160	-0,115	-0,082	-0,224	-0,163	-0,116	-0,315	-0,223	-0,158	
41	-0,005	-0,004	-0,004	-0,005	-0,005	-0,005	-0,007	-0,007	-0,007	
45	-0,354	-0,258	-0,188	-0,484	-0,357	-0,261	-0,661	-0,481	-0,352	
47	-0,111	-0,081	-0,059	-0,153	-0,113	-0,083	-0,209	-0,154	-0,110	
51	0,443	0,330	0,246	0,594	0,446	0,332	0,797	0,596	0,441	
53	-0,007	-0,006	-0,005	-0,008	-0,006	-0,004	-0,009	-0,008	-0,007	
57	1,038	0,745	0,531	1,440	1,041	0,746	1,987	1,437	1,036	
58	-0,223	-0,164	-0,120	-0,304	-0,226	-0,167	-0,412	-0,301	-0,221	
59	-0,072	-0,051	-0,036	-0,100	-0,075	-0,053	-0,138	-0,099	-0,071	
64	-0,031	-0,022	-0,015	-0,043	-0,034	-0,024	-0,061	-0,041	-0,029	
66	-0,024	-0,017	-0,012	-0,035	-0,025	-0,019	-0,049	-0,037	-0,023	
69	0,080	0,061	0,046	0,103	0,083	0,063	0,132	0,100	0,078	
73	0,021	0,016	0,012	0,028	0,024	0,018	0,038	0,025	0,020	
75	0,019	0,010	0,004	0,033	0,021	0,012	0,055	0,031	0,017	
78	-0,005	-0,003	-0,002	-0,006	-0,004	-0,003	-0,009	-0,006	-0,005	
84	-0,086	-0,053	-0,034	-0,126	-0,089	-0,056	-0,183	-0,123	-0,070	

а)



б)



в)

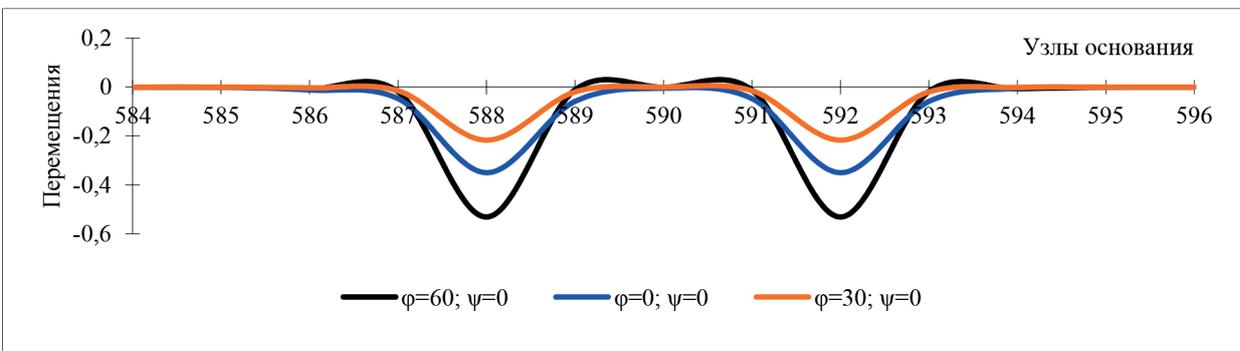
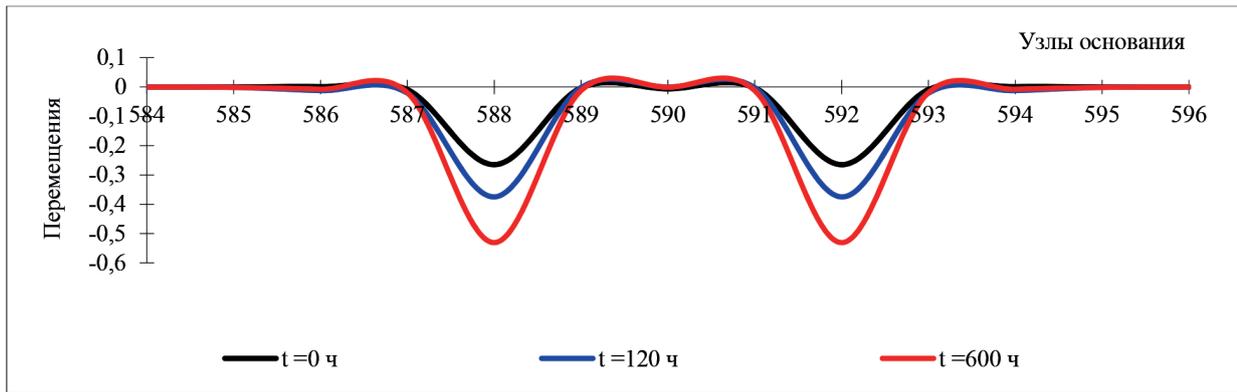


Рис. 3. Эпюры упругих перемещений ($10^{-6}P$) морского основания в сечении $I-I$ в зависимости от углов наклона φ и отклонения оси сооружения от простирания ψ плоскости изотропии под действием произвольных внешних нагрузок по всей верхней плите в разные моменты времени: а — при $t = 0$ ч; б — при $t = 120$ ч; в — при $t = 600$ ч

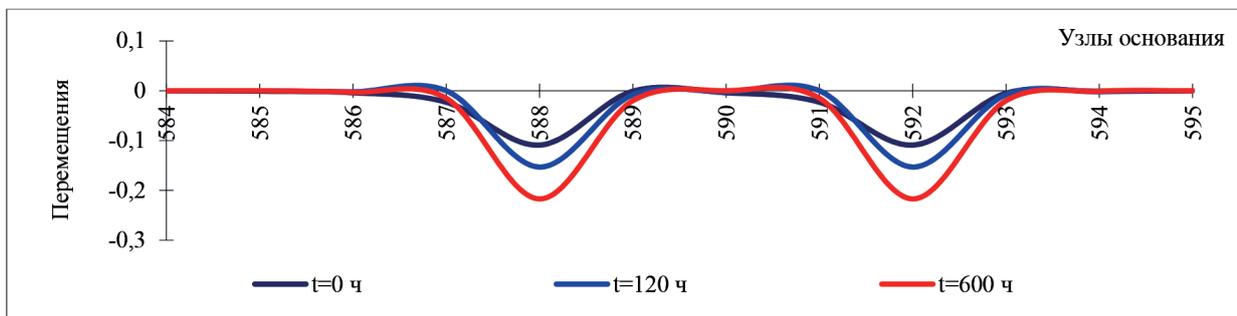
На рис. 4 и 5 показаны перемещения только для двух опор по оси Y (сечение $I-I$) и трех опор по оси X (сечение $2-2$), однако характер перемещений не меняется и для других опор. С течением времени перемещения основания растут только в области действия силы, т. е. наблюдается местная ползучесть горных пород.

Рассмотрим упругое напряженно-деформированное состояние системы, находящейся под действием полосовой распределенной нагрузки вдоль пролета верхней плиты платформы в различные промежутки времени.

а)



б)



в)

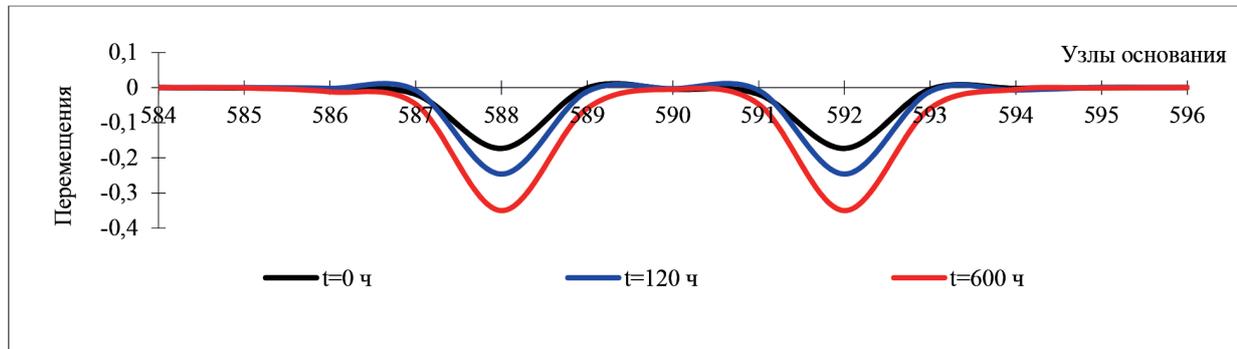
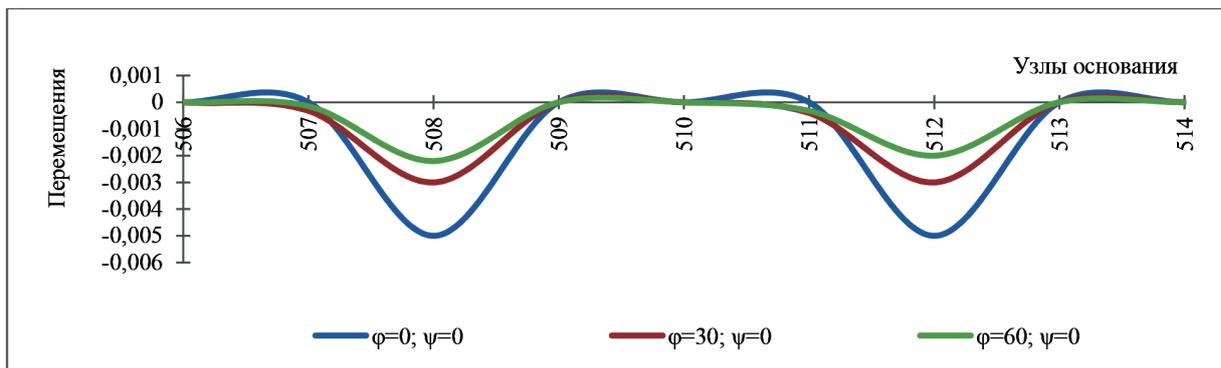


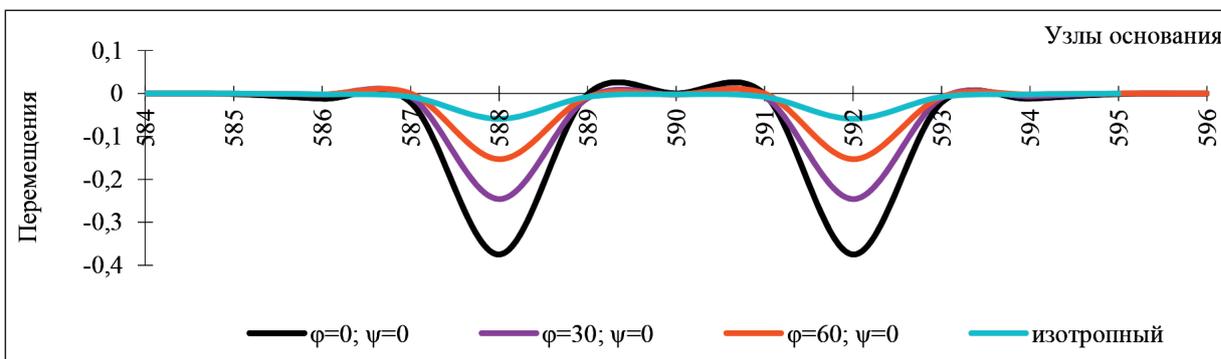
Рис. 4. Эпюры упругих перемещений ($10^{-6}P$) морского основания в сечении 1-1 при фиксированных углах наклона φ и отклонения оси сооружения от простирания ψ плоскости изотропии под действием произвольных внешних нагрузок по всей верхней плите:
 а — при $\varphi = 0^\circ$; б — при $\varphi = 30^\circ$; в — при $\varphi = 60^\circ$

На рис. 6 показаны эпюры упругих и упруго-ползучих перемещений w на границе изучаемого объекта, а в табл. 3 приведены значения его упругих перемещений и напряжений. Величина угла падения плоскости изотропии коренным образом влияет на характер распределения перемещений: с ростом угла падения плоскости слоев пород φ вертикальные перемещения значительно уменьшаются, при этом угол отклонения оси сооружения линии простирания плоскости изотропии не влияет на характер перемещений. Кроме того, на величину перемещений оказывает влияние и интенсивность действующей силы. При любом угле падения плоскости изотропии слоистых пород величины перемещений почти в три раза больше, чем соответствующие перемещения в упругом изотропном основании. При расположении опор на плоскости изотропии наблюдается смещение в сторону и дальнейшее увеличение угла падения до $\varphi = 60^\circ$, что приводит к выпору породы (см. рис. 5, в).

а)



б)



в)

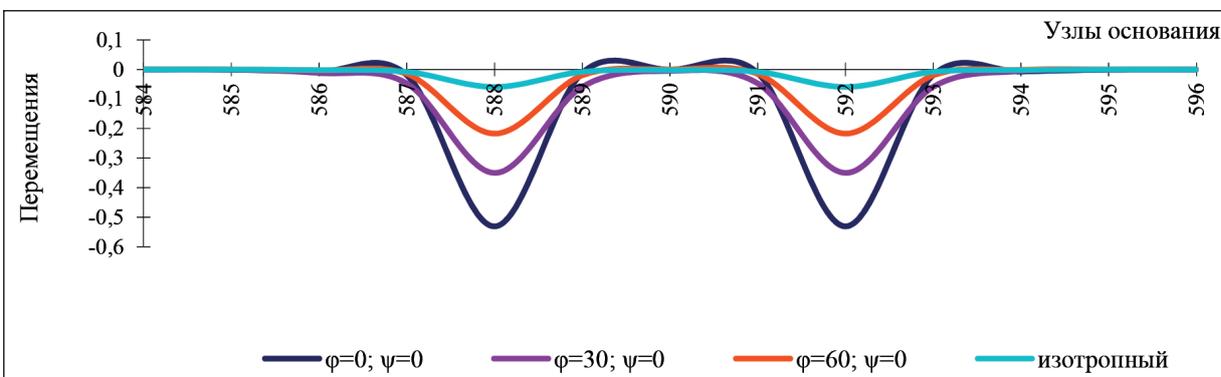
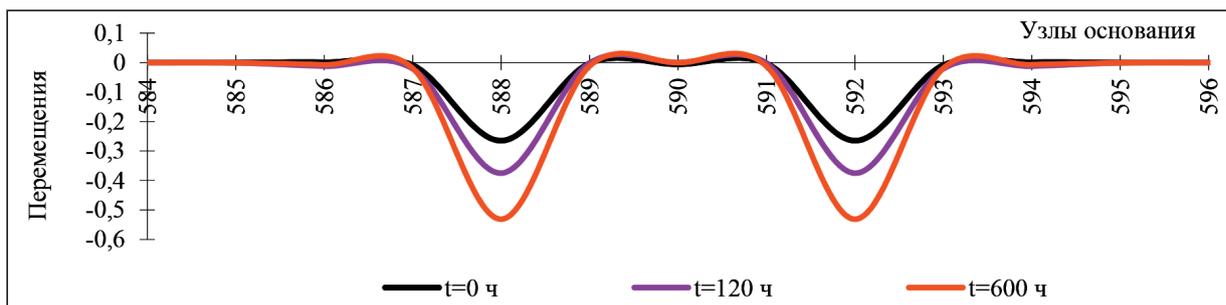
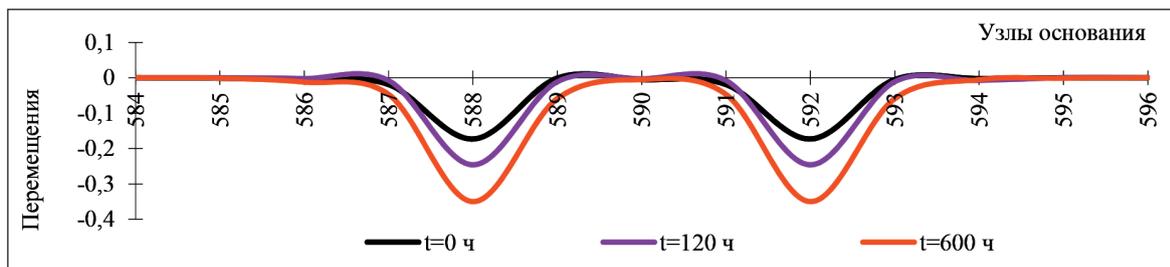


Рис. 5. Эпюры упругих перемещений ($10^{-6}P$) морского основания в сечении 2-2 в зависимости от углов наклона φ , отклонения оси сооружения простираения ψ плоскости изотропии и действующих произвольных внешних нагрузок на полосе плиты в различные моменты времени: а — в начальный момент времени при $t = 0$; б — при $t = 120$ ч; в — при $t = 600$ ч

а)



б)



в)

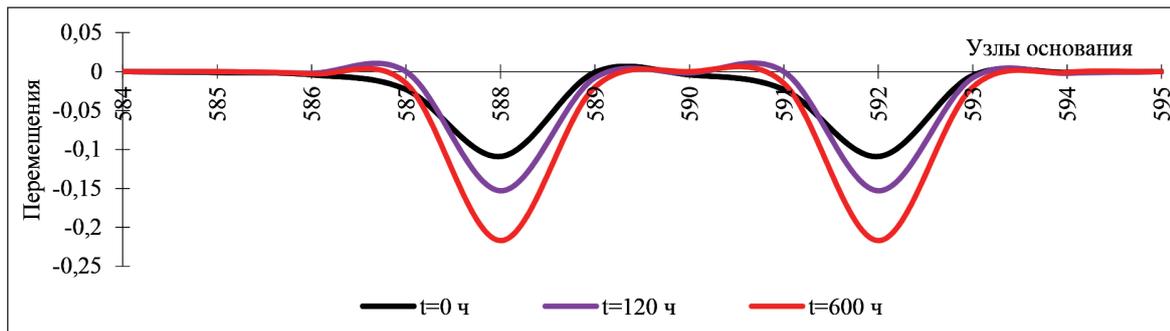


Рис. 6. Эпюры упругих перемещений ($10^{-6}P$) морского основания в сечении 1-1 при фиксированных углах наклона φ и отклонения оси сооружения от простираения ψ плоскости изотропии при действии произвольных внешних нагрузок по всей верхней плите в разные моменты времени:
 а — при $\varphi = 0^\circ$; б — при $\varphi = 30^\circ$; в — при $\varphi = 60^\circ$ (окончание)

Таблица 3

Значения упругих перемещений $10^{-6}P$ конструкций морской буровой платформы в зависимости от угла наклона φ плоскости изотропии морского основания с учетом фактора времени под действием полосовой внешней распределенной нагрузки на платформу в узлах 2, 3, 6, 7, 10, 11, 14, 15, 18, 17

Номер узла	Перемещения с учетом фактора времени и угла наклона плоскости изотропии, град.									
	$t = 0$			$t = 120$			$t = 600$			
	$\varphi = 0$	$\varphi = 30$	$\varphi = 60$	$\varphi = 0$	$\varphi = 30$	$\varphi = 60$	$\varphi = 0$	$\varphi = 30$	$\varphi = 60$	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
Верхняя плитная часть	3	-6,748	-4,986	-3,689	-9,142	-6,750	-4,988	-12,40	-9,145	-6,75
	4	0,349	0,262	0,197	0,466	0,352	0,265	0,621	0,468	0,349
	7	3,454	2,460	1,738	4,818	3,456	2,462	6,689	4,820	3,454
	8	2,967	2,153	1,561	4,086	2,969	2,155	5,625	4,089	2,967
	11	0,775	0,603	0,470	1,000	0,779	0,605	1,294	1,005	0,775
	12	0,104	0,073	0,052	0,147	0,107	0,075	0,206	0,149	0,104
	15	-13,10	-9,814	-7,364	-17,50	-13,10	-9,817	-23,41	-17,50	-13,1
	16	0,973	0,728	0,545	1,300	0,975	0,729	1,738	1,303	0,973
	18	-0,035	-0,014	-0,001	-0,064	-0,037	-0,016	-0,103	-0,067	-0,035
	21	0,044	0,067	0,074	-0,003	0,046	0,069	-0,087	-0,006	0,044
Нижняя плитная часть	22	-0,199	-0,153	-0,117	-0,261	-0,201	-0,154	-0,342	-0,264	-0,199
	26	-0,857	-0,661	-0,509	-1,110	-0,860	-0,663	-1,435	-1,114	-0,857
	27	-3,768	-2,710	-1,948	-5,235	-3,772	-2,712	-7,268	-5,238	-3,77
	28	0,255	0,182	0,129	0,356	0,257	0,183	0,498	0,358	0,255
	33	0,011	0,003	-0,002	0,025	0,014	0,005	0,046	0,027	0,011
	34	0,049	0,036	0,026	0,067	0,051	0,037	0,091	0,069	0,049
	35	0,087	0,064	0,047	0,119	0,089	0,066	0,162	0,121	0,087
	39	-0,143	-0,102	-0,073	-0,200	-0,146	-0,104	-0,282	-0,204	-0,143
	45	-1,077	-0,760	-0,536	-1,522	-1,079	-0,762	-2,151	-1,524	-1,08
	46	-0,088	-0,062	-0,043	-0,124	-0,091	-0,064	-0,174	-0,126	-0,088
	47	-0,311	-0,216	-0,150	-0,446	-0,314	-0,217	-0,638	-0,448	-0,311
	51	-0,216	-0,191	-0,166	-0,239	-0,218	-0,195	-0,254	-0,242	-0,216
	52	0,014	0,013	0,012	0,013	0,017	0,014	0,012	0,015	0,014
	57	0,427	0,313	0,227	0,578	0,429	0,314	0,774	0,580	0,427
	58	-0,231	-0,169	-0,123	-0,315	-0,233	-0,172	-0,429	-0,317	-0,231

Таблица 3
(Окончание)

59	-0,087	-0,060	-0,041	-0,125	-0,089	-0,062	-0,178	-0,126	-0,087
64	-0,029	-0,020	-0,014	-0,041	-0,031	-0,023	-0,058	-0,044	-0,029
65	0,004	0,002	0,000	0,009	0,007	0,004	0,015	0,011	0,004
66	-0,032	-0,022	-0,015	-0,046	-0,035	-0,024	-0,065	-0,048	-0,032
69	0,080	0,061	0,047	0,102	0,081	0,064	0,130	0,105	0,080
78	-0,004	-0,003	-0,002	-0,006	-0,006	-0,004	-0,008	-0,006	-0,004
80	-0,265	-0,173	-0,109	-0,375	-0,246	-0,153	-0,531	-0,350	-0,217

На рис. 7 показаны перемещения для разных моментов времени при углах наклона плоскости изотропии $\varphi = 0^\circ, 30^\circ, 60^\circ$ только для двух опор сечения $l-l$, однако характер перемещений не меняется и для других пар опор. При фиксированных углах падения плоскости изотропии на перемещения оказывает влияние длительность приложенной нагрузки.

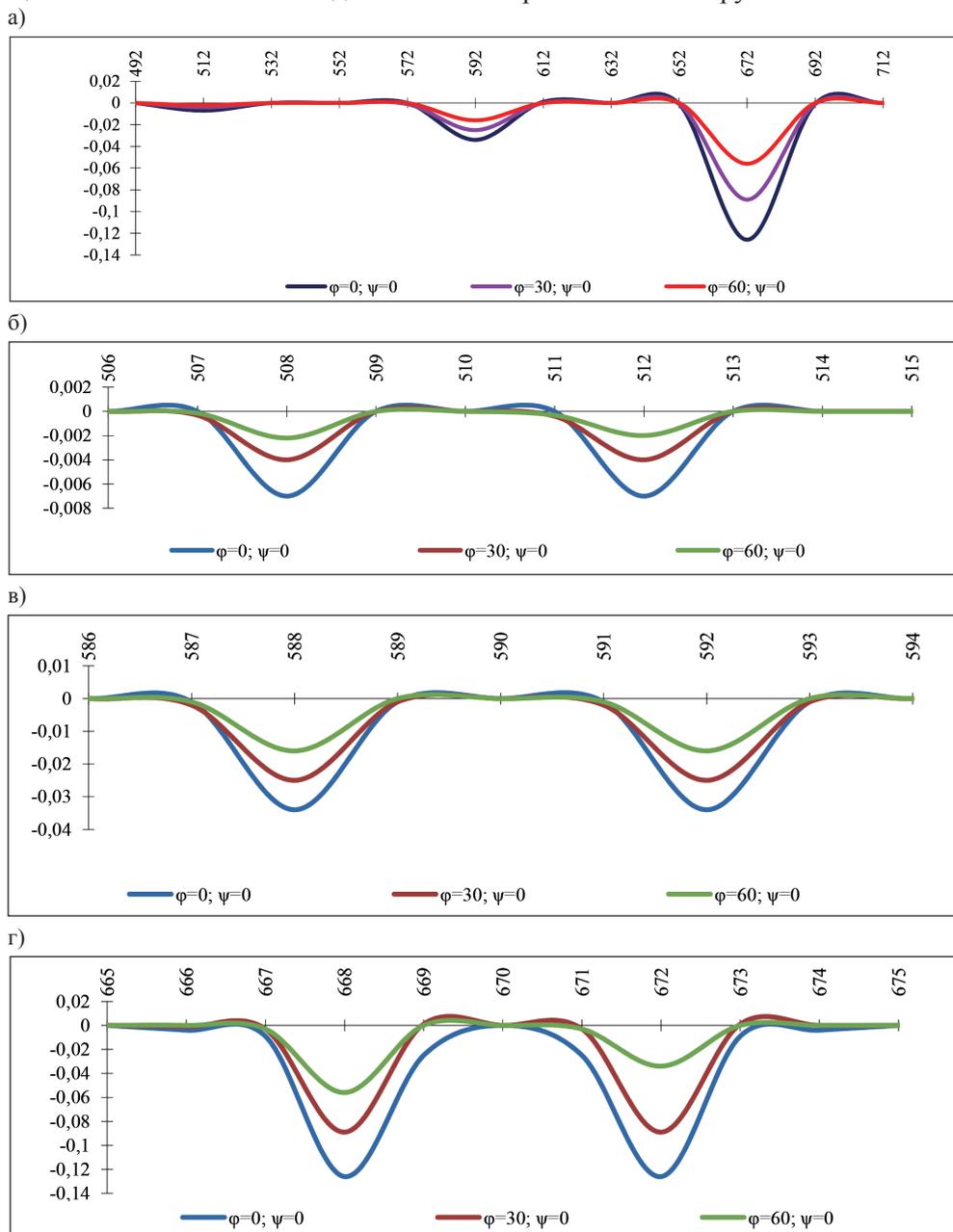


Рис. 7. Эпюры начальных упругих перемещений $10^{-6} \times P$ поверхности морского дна в сечении 4-4 в зависимости от углов наклона φ и отклонения оси сооружения от линии простираения ψ плоскости изотропии основания под действием сосредоточенных нагрузок в местах установки буровой вышки: а — в сечении 4-4; б — в сечении 3-3; в — в сечении 2-2; г — в сечении 1-1

Иная картина наблюдается под действием сосредоточенной нагрузки в узлах 14, 15, 17, 18 верхней плиты платформы в точках расположения буровой вышки (см. рис. 2, з). Ползучесть горных пород основания оказывает влияние на значения перемещений: до времени стабилизации деформации осадка морского дна увеличивается в 2 раза под опорами, где нет нагрузок, в средней части она увеличивается в 3 раза, а под опорами, где непосредственно действуют внешние усилия — в 4 раза. На рис. 8 приведены эпюры упругих перемещений в сечениях в зависимости от значений углов φ .

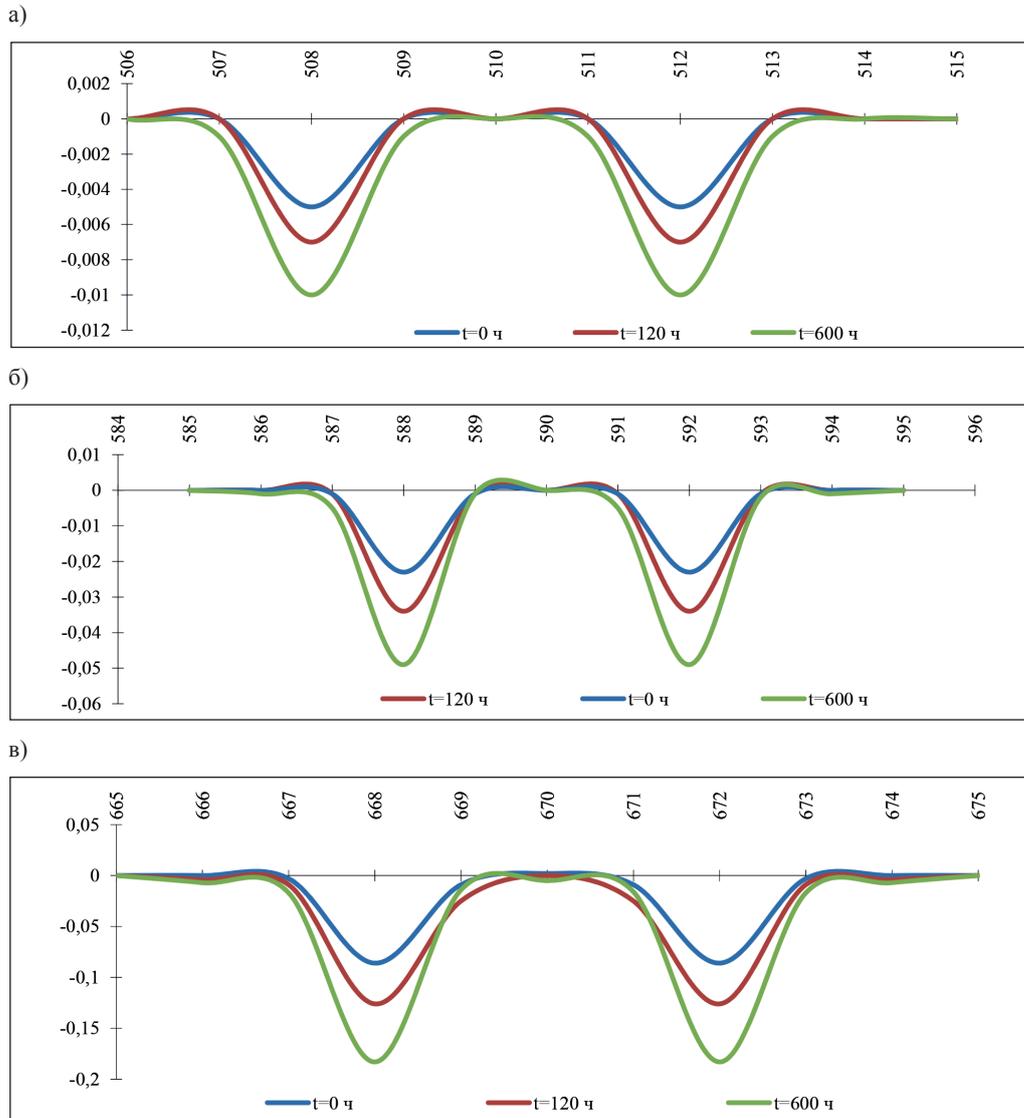


Рис. 8. Эпюры упругих перемещений ($10^{-6} \times P$) поверхности морского дна в сечении 1-1 в условиях ползучести основания при $\varphi = 30^\circ$ под действием сосредоточенных нагрузок в местах установки буровой вышки: а — в сечении 1-1; б — в сечении 2-2; в — в сечении 3-3

Обсуждение (Discussion)

Характерный для шельфа Каспийского моря наклоннослоистый массив морского основания с жесткосцепленными между собой плоскопараллельными слоями представляет собой упругое трансотропное тело с плоскостью изотропии, совпадающей с плоскостью напластования слоев, и условно подчиняющийся уравнениям основного закона Гука для общего слоя анизотропии. Коэффициенты деформации и модули упругости зависят от пяти упругих постоянных, угла наклона плоскости изотропии и угла отклонения оси нефтепромыслового сооружения от плоскости простирания плоскости изотропии [7], [8].

Пространственная конструкция разбивается на стержневые элементы, взаимодействующие между собой в узлах. Все узлы и элементы нумеруются, причем указываются начало и конец каждого расчетного элемента. Способ разбивки изучаемого объекта является произвольным, но в местах наибольших изменений кинематических и силовых характеристик следует сгущать сетки конечных элементов [9], [10].

Определение волновых нагрузок производится в два этапа: первый этап — используя соответствующую волновую теорию, определяют изменение поверхности воды и кинематику потока жидкости, начиная с изменения волновой поверхности моря по высоте; второй этап — исходя из формулы Морисона или дифракционной теории, определяют гидродинамические силы. Ветровая нагрузка состоит из двух слагаемых: первая — статическая составляющая — соответствует установившемуся скоростному напору, вторая — пульсационная составляющая нагрузки от ветра — описывается эмпирическим спектром Давенпорта. Течение на Каспийском море установившееся и действующее с постоянной скоростью, а нагрузка, действующая на вертикальную опору, определяется формулой Морисона. При воздействии течения на сооружения вокруг опоры образуются вихревые следы. Когда вихревые следы отделяются от преград, вокруг них остается равная ей и противоположно направленная циркуляция. Это приводит к образованию боковой силы, действующей перпендикулярно направлению течения. Силы бокового давления зависят от скорости потока и диаметра преграды. Давление льда на опору принимается по формуле Коржавина.

Заключение (Conclusion)

В данной работе рассмотрены статические задачи оценки упругого напряженного и деформированного состояния системы «морская буровая платформа – донное основание» в зависимости от действия вертикальных статических и горизонтальных сил, а также предложена методическая основа приближенного расчета методом конечных элементов с разработкой алгоритмов и пакетом прикладных программ.

С целью установления размеров расчетной области и количества расчетных элементов, а также для проведения проверки разработанных алгоритмов на основе составленного пакета прикладной программы решен ряд тестовых задач: выполнено сравнение значений напряжений в разных точках изотропного полупространства от действия вертикальной сосредоточенной силы P , полученных аналитическим методом, со значениями, полученными методом конечных элементов; проведены сравнения значений напряжений в стержневых элементах под действием сосредоточенной силы P в одном элементе со значениями, полученными по методу конечных элементов.

Выполнением многовариантных расчетов было установлено, что при действии сосредоточенных и распределенных сил угол наклона плоскости изотропии и угол отклонения оси морской буровой платформы существенным образом влияет на закономерности распределения напряжений и перемещений как в конструкциях морской буровой платформы, так в донном основании: наибольшие напряжения и перемещения контактной поверхности наблюдаются при горизонтальном залегании слоев массива.

Проанализировав полученные численные результаты, следует отметить, что во всех случаях действия внешних сил значения статических перемещений и напряжений в конструкциях морской буровой платформы и морском основании зависят только от угла наклона плоскости изотропии φ . Угол отклонения оси сооружения от линии простирания ψ оказывает влияние на напряженно-деформированное состояние системы «морская буровая платформа – анизотропное морское основание» в том случае, когда опоры расположены друг от друга на расстоянии, равном или меньшем высоты опоры.

Увеличение угла наклона плоскости изотропии оказывает существенное влияние на зону распространения статических перемещений и напряжений в массиве, а именно происходит сужение зоны. Следует отметить, что увеличение угла наклона плоскости изотропии φ оказывает влияние на напряженно-деформированное состояние конструкции нижней части платформы, заметно

уменьшая значения напряжений, но в то же время не влияет на концентрацию напряжений в зоне выреза установки буровой вышки, что оказывает влияние на верхнюю плитную часть. Влажность горных пород, слагающих морское дно, сказывается на количестве перемещений, увеличивая значения примерно в 1,5 раза, при этом напряжения, соответственно, уменьшаются в 1,5 раза.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Осипов В. И. Физико-химическая теория эффективных напряжений в грунтах / В. И. Осипов // Грунтоведение. — 2013. — Т. 2. — № 3. — С. 3–35.
2. Краснощечков Ю. В. Основы проектирования конструкций зданий и сооружений / Ю. В. Краснощечков, М. Ю. Заполева. — М.: Инфра-Инженерия, 2018. — 296 с.
3. Ermakova A. V. Additional Finite Element Method for Analysis of Reinforced Concrete Structures at Limit States / A. V. Ermakova. — M: Publishing house ASV, 2012. — 114 p.
4. Лобковский Л. И. Технологии комплексного мониторинга акваторий в условиях освоения нефтегазовых месторождений / Л. И. Лобковский, С. А. Ковачев // Труды Международного симпозиума «Инновационные технологии в исследовании окружающей среды «RE: 2013 – Research Environments 2013». — М.; Ларнака (Кипр): МФТИ, 2013. — С. 24–34.
5. Безродных Ю. П. Инженерно-геологические изыскания, выполняемые на акватории Каспийского моря / Ю. П. Безродных // Инженерные изыскания. — 2014. — № 4. — С. 54–58.
6. Маштаков А. С. Геологические и геодинамические риски, возникающие при взаимодействии нефтяных платформ с грунтом в Каспийском море / А. С. Маштаков // Интернет-Вестник ВолгГАСУ. — 2013. — № 3 (28). — С. 5.
7. Беспалов А. Г. Гидротехнические сооружения / А. Г. Беспалов [и др.] — М.: КНОРУС; Астрахань: АГУ, ИД «Астраханский университет», 2016. — 94 с.
8. Постников М. М. Механика грунтов, основания и фундаменты / М. М. Постников. — СПб.: Лань КПТ, 2016. — 416 с.
9. Suleimenov T. Road design by taking into account analysis of stress-strain state of bare boards / T. Suleimenov [et al.] // New Trends in Process Control and Production Management. — London: CRC Press, 2018. — Pp. 497–507.
10. Султанов Т. Т. Напряженно-деформированное состояние конструкций морского порта «подпорная стенка – фундаментная плита – анизотропное основание» / Т. Т. Султанов, Г. М. Тлепиева, Ш. Ш. Саттарова // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2018. — Т. 10. — № 1. — С. 122–134. DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-1-122-134.

REFERENCES

1. Osipov, V. I. “Fiziko-khimicheskaya teoriya effektivnykh napryazhenii v gruntakh.” *Gruntovedenie* 2.3 (2013): 3–35.
2. Krasnoshechikov, Yu. V., and M. Yu. Zapolleva. *Osnovy proektirovaniya konstruktssii zdaniy i sooruzhenii*. M.: Infa-Inzheneriya, 2018.
3. Ermakova, A. V. *Additional Finite Element Method for Analysis of Reinforced Concrete Structures at Limit States*. M: Publishing house ASV, 2012.
4. Lobkovskii, L. I., and S. A. Kovachev. “Tekhnologii kompleksnogo monitoringa akvatorii v usloviyakh osvoeniya neftegazovykh mestorozhdenii.” *Trudy Mezhdunarodnogo simpoziuma «Innovatsionnye tekhnologii v issledovanii okruzhayushchei sredy «RE: 2013 – Research Environments 2013»*. M.–Larnaka Kipr: MFTI, 2013. 24–34.
5. Bezrodnykh, Yu. P. “Engineering-geological surveys carried out in the Caspian sea water area for development of the oil and gas resources.” *Inzhenernyye izyskaniya* 4 (2014): 54–58.
6. Mashtakov, Aleksandr Sergeevich. “Geological and geodynamic risks arising at interaction of oil platforms and soil in the Caspian Sea.” *Internet-Vestnik VolgGASU* 3(28) (2013): 5.
7. Bespalov, A. G., A. L. Sal’nikov, O. N. Bespalova, and S. A. Davydova. *Gidrotekhnicheskie sooruzheniya*. M.: KNORUS; Astrakhan’: AGU, ID «Astrakhanskii universitet», 2016.
8. Postnikov, M. M. *Mekhanika gruntov, osnovaniya i fundamenty*. SPb.: Lan’ KPT, 2016.

9. Suleimenov, T., T. Sultanov, G. Tlepiyeva, and Y. Sovet. "Road design by taking into account the analysis of stress-strain state of bare boards." *New Trends in Process Control and Production Management*. Edited By Lenka Štofová, and Petra Szaryszová. CRC Press, 2017. 497–505.

10. Sultanov, Timur T., Gulnar M. Tlepiyeva, and Sholpan Sh. Sattarova. "The stress deformed state of marine port structures with support wall as fundamental plate." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova* 10.1 (2018): 122–134. DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-1-122-134.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Султанов Тимур Тулеугалиевич —
кандидат технических наук, доцент
Евразийский национальный университет
имени Л. Н. Гумилёва
010000, Республика Казахстан, Астана,
ул. Сатпаева, 3
e-mail: rumit78@mail.ru

Тлепиева Гульнар Муратовна —
кандидат технических наук, доцент
Евразийский национальный университет
имени Л. Н. Гумилёва
010000, Республика Казахстан, Астана,
ул. Сатпаева, 3
e-mail: tlepiyevagm@yandexl.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Sultanov, Timur T. —
PhD, associate professor
Eurasian National University named
after L.N. Gumilev
3 Satpaev Str., Astana, 010000,
Republic of Kazakhstan
e-mail: rumit78@mail.ru

Tlepiyeva, Gulnar M. —
PhD, associate professor
Eurasian National University named
after L.N. Gumilev
3 Satpaev Str., Astana, 010000,
Republic of Kazakhstan
e-mail: tlepiyevagm@yandexl.ru

*Статья поступила в редакцию 17 сентября 2018 г.
Received: September 17, 2018.*

DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-5-975-982

RESEARCH OF THE DENSITY OF TRANSPORTS FLOWS ON THE NORTHERN SEA ROUTE IN 2018 YEAR

E. O. Ol'khovik

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

The dynamics of parameter's change in sea traffic flows in the water area of the Northern Sea Route following of navigation in 2018 was studied. A general description of the conditions of navigation in the waters of the Arctic seas is presented. The importance of large-tonnage transport ships in the total volume of transported cargo is noted. A list of the main directions in which the carriage of goods by sea is performed in the year-round navigation mode. The list of measures, the solution of which will allow to increase the volume of cargo transportation in the water area of the Northern Sea Route to 80 million tons by 2024, has been determined. The list includes measures for the construction of new icebreakers and large-capacity vessels of a reinforced ice class, the search for solutions to reduce the influence of the seasonality factor on the rhythm and volume of freight traffic. The necessity of developing the theory of maritime transport flows is substantiated. The plan of main scientific and practical problems, the solution of which can be obtained using the methods of the theory of traffic flows, is established. The role and significance of experimental data in the developed theory is determined. The place of the results of the presented research in the complex of scientific works conducted at the Arctic Faculty of the Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping was noted. The description of the methods used in the study of parameters of sea transport flows, as well as sources of information. Comparative quantitative estimates of changes in the density of traffic of transport vessels in the waters of the Northern Sea Route depending on the navigation period, as well as comparative characteristics of the density of ship flows of the Kara Sea and the rest of the water area of the Northern Sea Route are presented. According to the results of the experimental data of 2018, some specific features of the functioning of the Arctic sea transport system were identified. The goal and objectives of further research are defined.

Keywords: Northern Sea Route, large-tonnage vessels, sea traffic flows, geof ormation system, speed study regime.

For citation:

Ol'khovik, Evgeniy O. "Research of the density of transports flows on the Northern Sea Route in 2018 year." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 10.5 (2018): 975–982. DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-5-975-982.

УДК 528.47

ИССЛЕДОВАНИЕ ПЛОТНОСТИ ТРАНСПОРТНЫХ ПОТОКОВ 2018 ГОДА В АКВАТОРИИ СЕВЕРНОГО МОРСКОГО ПУТИ

Е. О. Ольховик

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

Исследована динамика изменения параметров морских транспортных потоков в акватории Северного морского пути по итогам навигации 2018 г. Представлена общая характеристика условий плавания в акватории арктических морей. Отмечено значение крупнотоннажных транспортных судов в общем объеме перевозимых грузов. Приводится перечень основных направлений, по которым выполняется морская перевозка грузов в режиме круглогодичной навигации. Определен перечень мероприятий, решение которых позволит обеспечить увеличение объема грузоперевозок в акватории Северного морского пути до 80 млн т к 2024 г. В перечень включены мероприятия по строительству новых ледоколов и крупнотоннажных судов усиленного ледового класса, поиск решений по снижению влияния фактора сезонности на ритмичность и объемы грузоперевозок. Обоснована необходимость разработки теории морских транспортных потоков. Установлен перечень основных научных и практических задач, решение которых может быть полу-

чено с использованием методов теории транспортных потоков. Определена роль и значение экспериментальных данных в разрабатываемой теории. Отмечено место результатов представленных исследований в комплексе научных работ, проводимых на Арктическом факультете Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. Приведено описание методов, использованных при исследовании параметров морских транспортных потоков, а также источников информации. Приведены сравнительные количественные оценки изменения плотности потоков транспортных судов в акватории Северного морского пути в зависимости от навигационного периода, а также сравнительные характеристики плотности судовых потоков Карского моря и остальной части акватории Северного морского пути. По результатам экспериментальных данных 2018 г. определены некоторые специфические особенности функционирования арктической морской транспортной системы. Определена цель и задачи дальнейших исследований.

Ключевые слова: Северный морской путь, крупнотоннажные суда, морские транспортные потоки, геоинформационная система, исследование скоростных режимов

Для цитирования:

Ольховик Е. О. Исследование плотности транспортных потоков 2018 года в акватории Северного морского пути / Е. О. Ольховик // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2018. — Т. 10. — № 5. — С. 975–982. DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-5-975-982.

Введение (Introduction)

В акватории Северного морского пути (СМП) складываются устойчивые морские транспортные потоки, основу которых составляют крупнотоннажные транспортные суда с ледовым классом усиления Arc7, предназначенные для круглогодичного плавания в акватории СМП и способные без сопровождения ледоколов преодолевать ледовые поля толщиной 1,5–2,1 м.

По состоянию на 25 октября 2018 г., в Карском море в режиме круглогодичной навигации работало 19 транспортных судов по двум основным направлениям: западная граница СМП – Обская Губа; западная граница СМП – Енисейский залив. По первому направлению работало семь танкеров, перевозящих сжиженный природный газ (СПГ) из порта Сабетта, и шесть танкеров, обеспечивающих вывоз нефти из порта Новый порт. По второму направлению работало шесть судов, обслуживающих ПАО «ГМК «Норильский Никель» [1]. Кроме того, в летний период к перевозкам СПГ привлекались крупнотоннажные суда, имеющие более низкий класс ледового усиления, такие как танкер «Иртыш» (ИМО 9397535), «Ангара» (ИМО 9397535 Arc4), «Дон» (ИМО 9385142, Arc4), а также суда ледового класса Ice2 «Псков» (ИМО 9630028), «Мелампус» (ИМО 9654878) и др. По сравнению с 2014 г. количество транспортных судов с категорией Arc7 в 2018 г. увеличилось в 3 раза, а по валовой вместимости — более чем в 10 раз. Общий объем грузоперевозок по СМП в 2014 г. составил 3,7 млн т, в 2018 г., по прогнозам Федерального агентства морского и речного флота, общий объем возрастет примерно в 4 раза [2].

Увеличение годового грузооборота до 80 млн т [3] к 2024 г. ставит новые задачи по обеспечению безопасности и эффективности работы морского транспорта в арктических морях России. К таким задачам относятся: строительство новых ледоколов и крупнотоннажных судов усиленного ледового класса; модернизация портовой инфраструктуры; поиск решений по снижению влияния фактора сезонности на ритмичность и объемы грузоперевозок; внедрение систем разделения движения судов; снижение рисков, связанных с навигационными и экологическими авариями и др.

Резкое увеличение интенсивности и плотности транспортного потока в акватории СМП может усложнить условия судоходства, особенно в районах стесненного плавания, к которым относятся мелководные проливы, подходные каналы, а также условия судоходства по всей акватории СМП в условиях зимней навигации. Для изучения скоростных режимов движения морских судов в изменяющихся условиях СМП необходимо применять методы, разработанные в теории транспортных потоков (ТП) [4], [5]. В основе методов ТП используются данные экспериментальных наблюдений за движением транспортных средств в изменяющихся во времени реальных условиях. Одной из основных трудностей при исследовании транспортных потоков является выбор

информативных параметров транспортных потоков, а также организация и анализ измеренных показателей.

Исследование транспортных потоков в акватории СМП в настоящее время ведется по нескольким направлениям, к которым относятся:

- повышение ледопроеходимости судов [6], [7];
- разработка методов оптимизации судоходных маршрутов [8], [9];
- снижение рисков навигационных аварий [10], [11];
- оптимизация гидрографических работ в акватории СМП [12];
- совершенствование методов обеспечения арктического мореплавания [13].

На Арктическом факультете ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова» исследование СМП относится к основному научному направлению, включающему следующие задачи:

- оценка картографического обеспечения и гидрографической изученности рельефа дна акватории СМП [14], [15];
- методы сравнительной оценки акватории СМП по критерию навигационной безопасности [16];
- разработка географической информационной системы СМП [17];
- исследование транспортной арктической морской системы [18].

Настоящая работа посвящена исследованию изменения плотности морских транспортных потоков в акватории СМП по данным зимней и летней навигации 2018 г. Решаемая задача заключается в учете баланса количества судов, входящих и выходящих из акватории СМП, а также исследовании динамики изменений.

Методы и материалы (Methods and materials)

Исследование выполнялось с использованием методов и программного обеспечения, используемых в доступных географических информационных системах QGIS, ArcGis и Scanex Maritime [19]. В качестве картографической основы были использованы слои OSM / ESRIOcean. Исходную информацию составляли архивные сведения о маршрутах движения судов в акватории СМП, полученные по каналам автоматизированных информационных систем, а также официальные данные, предоставляемые пользователям Администрацией СМП [1]. Информация включала в себя следующие сведения:

- дата, время;
- название судна;
- тип судна;
- географические координаты судна;
- номер IMO судна;
- скорость судна;
- курс судна;
- направление движения судна (ETA);
- данные о тактико-технических характеристиках судна из регистрационной книги Российского морского регистра судоходства [20], Морского портала Сканэкс [19] и других доступных источников.

Первичная обработка данных включала их статистическую обработку, визуализацию, формирование информационных слоев в заданный временной отрезок времени, соответствующий суткам, месяцу, кварталу. Географические районы входа-выхода из акватории СМП были идентифицированы, средствами ГИС фиксировалась дата их пересечения выбранными судами и направление перехода.

Основные применяемые методы были апробированы в работах [21] и [22].

Результаты (Results)

Полученные данные свидетельствуют о том, что в летний навигационный период в акватории СМП ежедневно находится не менее 300 судов. Из этого количества непосредственно в морских грузоперевозках занята лишь часть судов. Исходя из этой особенности, информационные

слои ГИС подвергались фильтрации, суть которой сводилась к тому, что суда валовой вместимостью менее 4 тыс. т, буксиры, ледоколы, речные суда, научно-исследовательские суда, аварийно-спасательные суда, корабли Военно-морского флота и другие транспортные средства формировали отдельный информационный слой, который в расчетах не учитывался. Крупнотоннажные суда, участвующие в формировании грузовых потоков, формировали основной информационный слой. На рис. 1 показан фрагмент основного информационного слоя, относящегося к летне-осеннему навигационному периоду (август–октябрь 2018 г.).

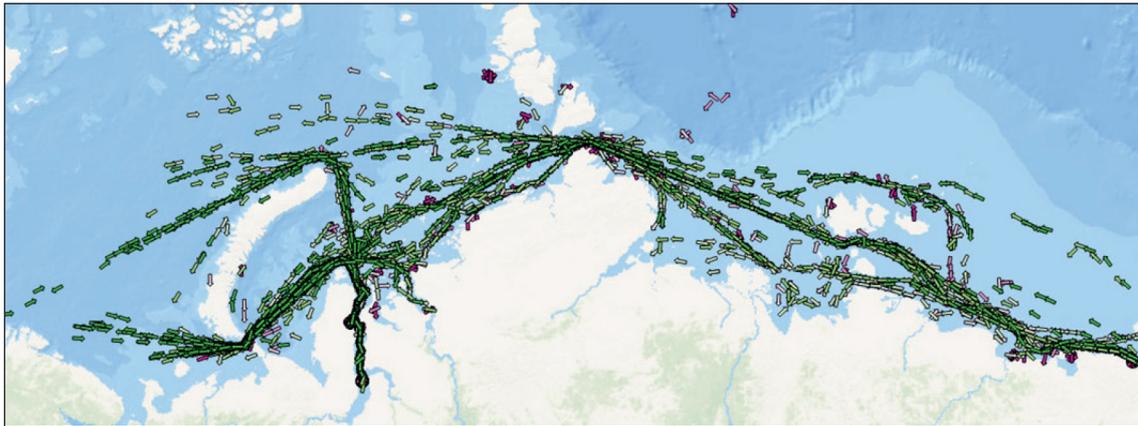


Рис. 1. ГИС-данные о маршрутах движения судов в акватории СМП в летне-осенний навигационный период (август–сентябрь 2018 г.)

Направления стрелок на рис. 1 соответствуют направлению движения отдельных судов, формирующих различные транспортные потоки, а их цвет соответствует скорости движения (цветовая палитра на схеме не показана). Показанный на рисунке информационный слой был использован для построения схемы распределения плотности транспортного потока в акватории СМП, представленной на рис. 2. Плотность судового потока в данном случае определялась как отношение количества судов к единице площади акватории. Распределение плотностей на рис. 2 показано цветовой палитрой (по мере возрастания плотности): желтый – красный – голубой – белый.

Наибольшая плотность отмечается в Карском море, на входе в залив Обская Губа, а также на линии от пролива Карские Ворота до входа в Обскую Губу. Повышенная плотность судовых потоков также отмечается в проливах Вилькицкого и Санникова, а также в Восточно-Сибирском море, на подходах к порту Певек.

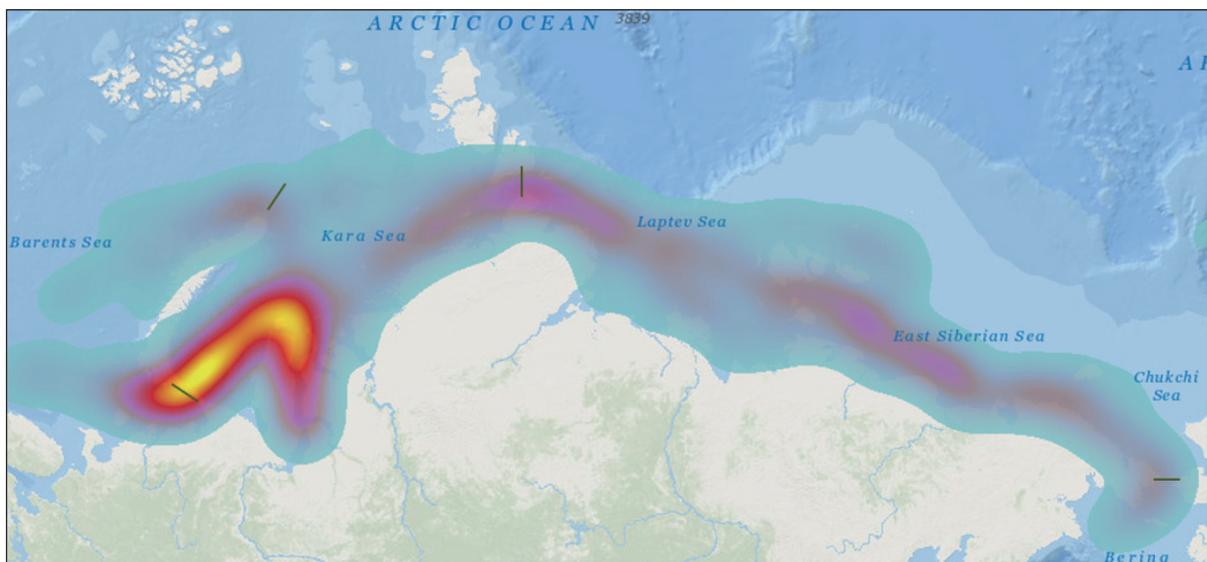


Рис. 2. Распределение плотности морских транспортных потоков в акватории СМП

На рис. 2 зелеными штрихами обозначены линии входа в акваторию Карского моря: пролив Карские Ворота, мыс Желания, пролив Вилькицкого, а также восточная линия входа в акваторию СМП — пролив Лонга. На линиях входа-выхода установлен «счетчик», который подсчитывал количество судов, входящих в акваторию СМП и покидающих ее в течение одного месяца в разные навигационные периоды. Данные результатов подсчета количества судов, приведенные в табл. 1 и 2, относятся к следующим временным отрезкам: начало зимней навигации 09.01.2018–16.02.2018 (табл. 1); окончание летней навигации 24.09.2018–25.10.2018 (табл. 2).

Таблица 1

Транспортный поток в акватории СМП на период 09.01.2018–16.02.2018

Граница	Вход	Выход
Карские Ворота	37	39
Мыс Желания	3	2
Пролив Вилькицкого	0	0
Берингов пролив	0	0
<i>Итого</i>	40	41
<i>Баланс</i>	+1	

Таблица 2

Транспортный поток в акватории СМП на период 24.09. 2018–25.10.2018

Граница	Вход	Выход
Карские Ворота	61	80
Мыс Желания	11	12
Пролив Вилькицкого	32	13
Берингов пролив	13	14
<i>Итого</i>	117	119
<i>Баланс</i>	+2	

Данные, приведенные в табл. 1, позволяют отметить, что в начале зимней навигации 2018 г. транспортный поток в Восточном секторе практически исчез. В акватории Карского моря транспортный поток стабилизировался на уровне 40–41 судна. Количество судов, входящих в акваторию СМП и покидающих ее обеспечивают динамическое равновесие системы.

Данные, приведенные в табл. 2, показывают, что в летне-осеннюю навигацию основной грузопоток был по-прежнему сосредоточен в акватории Карского моря и находился в состоянии динамического равновесия на уровне около 100 судов. По сравнению с периодом зимней навигации, летом судопоток крупнотоннажных судов увеличился почти в 2,5 раза.

В начале летней навигации в акватории СМП отмечается приток крупнотоннажных судов, а в конце наблюдается их отток.

Обсуждение результатов (Discussion of Results)

Использованная в работе методика позволяет получить количественные оценки основных параметров морских транспортных потоков в акватории СМП.

В результате проведенного исследования были отмечены следующие особенности арктической транспортной системы:

- в зимнюю навигацию для входа в акваторию СМП и выхода из нее используется преимущественно пролив Карские Ворота;
- в период тяжелых ледовых условий в Карском море на входе в акваторию СМП и выходе из нее используется переход через мыс Желания;
- в зимний и летний навигационные периоды транспортная система находится в динамическом равновесии, которое нарушается в начале и в конце летнего навигационного периода;
- плотность транспортных потоков в акватории СМП распределена неравномерно, зависит от времени года и требует дополнительного изучения;

- в зимний навигационный период интенсивность транспортных потоков крупнотоннажных судов сокращается более чем в два с половиной раза;
- в зимнюю навигацию морские перевозки в Центральном и Восточном секторах Арктики практически исчезают.

Выводы (Summary)

1. Морская арктическая транспортная система находится в стадии развития. Ежегодно в эксплуатацию вводится несколько крупнотоннажных транспортных судов с высоким классом ледового усиления, что снижает влияние фактора «сезонности» на основные показатели объемов грузоперевозок в акватории СМП.
2. Основной вклад в общий объем грузоперевозок вносят крупнотоннажные суда, обеспечивающие вывоз углеводородов из портов Обской Губы.
3. Используемая в работе методика сбора, хранения, обработки и визуализации данных повышает качество исследования морских транспортных систем.
4. По мере накопления данных планируется более полно и детально исследовать характеристики транспортных потоков, в том числе характеристики, связанные с пропускной способностью подходящих каналов портов Карского моря.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Администрация Северного морского пути [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <http://www.nsga.ru/> (дата обращения: 15.09.2018).
2. Федеральное агентство морского и речного транспорта [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <http://www.morflot.ru/> (дата обращения: 15.09.2018).
3. О национальных целях и стратегических задачах развития Российской Федерации на период до 2024 года: Указ Президента Российской Федерации от 7 мая 2018 г. № 204.
4. Zhang Z. Vessel traffic flow analysis and prediction by an improved PSO-BP mechanism based on AIS data / Z. G. Zhang, J. C. Yin, N. N. Wang, Z. G. Hui // *Evolving Systems*. — 2018. — Pp. 1–11. DOI: 10.1007/s12530-018-9243-y.
5. Benedyk I. V. A binary probit model to analyze freight transportation decision-maker perspectives for container shipping on the Northern Sea Route / I. V. Benedyk, S. Peeta // *Maritime Economics & Logistics*. — 2018. — Vol. 20. — Is. 3. — Pp. 358–374. DOI: 10.1057/s41278-016-0046-4.
6. Дехтярук Ю. Д. Некоторые вопросы создания морских транспортных систем для вывоза углеводородов из Арктики / Ю. Д. Дехтярук, А. А. Добродеев, К. Е. Сазонов // *Арктика: экология и экономика*. — 2013. — № 2 (10). — С. 84–91.
7. Добродеев А. А. Современные подходы к обеспечению навигации крупнотоннажных судов во льдах / А. А. Добродеев, Н. Ю. Клементьева, К. Е. Сазонов // *Транспорт Российской Федерации*. — 2015. — № 4 (59). — С. 29–32.
8. Акмайкин Д. А. Обзор функциональных возможностей и перспективы современных автоматизированных систем планирования маршрута судна / Д. А. Акмайкин, Д. Б. Хоменко, С. Ф. Ключева // *Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова*. — 2017. — Т. 9. — № 2. — С. 237–251. DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-2-237-251.
9. Акмайкин Д. А. Эвристический поиск оптимального маршрута судна по Северному морскому пути / Д. А. Акмайкин, С. Ф. Ключева, П. А. Салюк // *Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова*. — 2015. — № 5 (33). — С. 55–62. DOI: 10.21821/2309-5180-2015-7-5-55-62.
10. Некрасов С. Н. Определение навигационных рисков при имитационном моделировании управления судном при проходе узкости / С. Н. Некрасов, К. И. Ефимов, Д. В. Трененков // *Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова*. — 2014. — № 1 (23). — С. 34–36.
11. Tezikov A. Research of quantitative indicators of tightness of the northern sea route (NSR) / A. Tezikov, A. Afonin, V. Kljuev // *Proceedings of the International Conference on Port and Ocean Engineering under Arctic Conditions, POAC*. — 2017.

12. ФГУП «Гидрографическое предприятие» [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <http://www.hydro-state.ru/> (дата обращения: 15.09.2018).
13. В Санкт-Петербурге открылся Центр морских арктических компетенций [Электронный ресурс]. — Режим доступа: https://gumrf.ru/news/1/news_161018_3.html (дата обращения: 17.10.2018).
14. *Афонин А. Б.* Разработка методов оценки проходных глубин на трассах Северного морского пути в зависимости от подробности съёмки 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.
15. *Афонин А. Б.* Исследование влияния подробности гидрографической съёмки на оценку проходных глубин / А. Б. Афонин, И. Ю. Королев, А. Л. Тезиков // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2017. — Т. 9. — № 5. — С. 1007–1016. DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-5-1007-1016.
16. *Афонин А. Б.* Исследование факторов, влияющих на навигационную аварийность в условиях мелководья / А. Б. Афонин, И. Ю. Королев, А. Л. Тезиков // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2017. — Т. 9. — № 4. — С. 735–743. DOI: 10.21821/2309-5180-2017-8-4-735-743.
17. *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.
18. *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.
19. Морской портал Сканэкс [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <http://www.scanex.ru/cloud/maritime/> (дата обращения: 17.09.2018).
20. Регистровая книга РС [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://lk.rs-class.org/regbook/regbookVessel?ln=ru> (дата обращения: 17.09.2018).
21. *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.
22. *Ольховик Е. О.* Исследование количественных характеристик морских транспортных потоков на маршрутах Северного Морского пути / Е. О. Ольховик // Материалы международной научно-технической конференции «Техническая эксплуатация водного транспорта: проблемы и пути развития», 17–19 октября 2018 г. — Петропавловск-Камчатский: Камчатский государственный технический университет, 2018.

REFERENCES

1. Administratsiya Severnogo morskogo puti. Web. 15 Sept. 2018 <<http://www.nsr.ru/>>.
2. Federal'noe agentstvo morskogo i rechnogo transporta. Web. 15 Sept. 2018 <<http://www.morflot.ru/>>.
3. O natsional'nykh tselyakh i strategicheskikh zadachakh razvitiya Rossiiskoi Federatsii na period do 2024 goda: Ukaz Prezidenta Rossiiskoi Federatsii ot 7 maya 2018 g. № 204.
4. Zhang, Ze-guo, Jian-chuan Yin, Ni-ni Wang, and Zi-gang Hui. "Vessel traffic flow analysis and prediction by an improved PSO-BP mechanism based on AIS data." *Evolving Systems* (2018): 1–11. DOI: 10.1007/s12530-018-9243-y.
5. Benedyk, Irina V., and Srinivas Peeta. "A binary probit model to analyze freight transportation decision-maker perspectives for container shipping on the Northern Sea Route." *Maritime Economics & Logistics* 20.3 (2018): 358–374. DOI: 10.1057/s41278-016-0046-4.
6. Dekhtyaruk, Yu. D., A. A. Dobrodeev, and K. E. Sazonov. "Some questions on the establishment of marine transport systems for the removal of hydrocarbons from the Arctic." *Arctic: Ecology and Economy* 2(10) (2013): 84–91.
7. Dobrodeyev, A. A., N. Yu. Klementyeva, and K. Ye. Sazonov. "New approaches for the maintenance of large-sized ships' navigation in ice." *Transport of the Russian Federation* 4(59) (2015): 29–32.
8. Akmaykin, Denis A., Dmitry B. Khomenko, Svetlana F. Klueva. "Overview features and perspectives of modern automated ship route planning systems." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 9.2 (2017): 237–251. DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-2-237-251.

9. Akmaykin, Denis Aleksandrovich, Svetlana Fedorovna Klyueva, and Pavel Anatolievich Salyuk. "Heuristic search for the optimal route ship Northern Sea Route." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova* 5(33) (2015): 55–62. DOI: 10.21821/2309-5180-2015-7-5-55-62.
10. Nekrasov, S. N., K. I. Efimov, and D. V. Trenenkov. "Navigational risks calculation when modeling of sailing through the narrows." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 1(23) (2014): 34–36.
11. Tezikov, A., A. Afonin, and V. Kljuev. "Research of quantitative indicators of tightness of the northern sea route (NSR)." *Proceedings of the International Conference on Port and Ocean Engineering under Arctic Conditions, POAC*. 2017.
12. FGUP «Gidrograficheskoe predpriyatie». Web. 15 Sept. 2018 <<http://www.hydro-state.ru/>>.
13. V Sankt-Peterburge otkrylsya Tsentr morskikh arkticheskikh kompetentsii. Web. 17 Oct. 2018 <https://gumrf.ru/news/1/news_161018_3.html>.
14. 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.
15. Afonin, Andrej B., Ivan Yu. Korolev, and Aleksandr L. Tezikov. "Research of influence of the detail of hydrographic surveys on assessment of depths through passage." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova* 9.5 (2017): 1007–1016. DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-5-1007-1016.
16. Afonin, Andrej B., Ivan Ju. Korolev, and Aleksandr L. Tezikov. "A study of the factors influencing navigational accidents in shallow water." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 9.4 (2017): 735–743. DOI: 10.21821/2309-5180-2017-8-4-735-743.
17. Tezikov, A. L., A. B. Afonin, and Ye. O. Olkhovik. "The state of hydrographic exploration of the Northern Sea Route water area." *Transport of the Russian Federation* 2(75) (2018): 19–21.
18. 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
19. Morskoi portal Skaneks. Web. 17 Sept. 2018 <<http://www.scanex.ru/cloud/maritime/>>.
20. Registrovaya kniga RS. Web. 17 Sept. 2018 <<https://lk.rs-class.org/regbook/regbookVessel?ln=ru>>.
21. 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
22. Ol'khovik, E. O. "Issledovanie kolichestvennykh kharakteristik morskikh transportnykh potokov na marshrutakh Severnogo Morskogo puti." *Materialy mezhdunarodnoi nauchno-tekhnicheskoj konferentsii «Tekhnicheskaya ekspluatatsiya vodnogo transporta: problemy i puti razvitiya», 17-19 oktyabrya 2018 g.* Petropavlovsk-Kamchatskii: Kamchatskii gosudarstvennyi tekhnicheskii universitet, 2018.

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 17 сентября 2018 г.
Received: September 17, 2018.

СУДОСТРОЕНИЕ И СУДОРЕМОНТ

DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-5-983-992

ASSESSMENT OF INFLUENCE OF ELASTIC PROPERTIES OF THE FODDER DEADWOOD BEARING ON VALUE OF OWN FREQUENCY AT LINEAR CROSS FLUCTUATIONS OF THE SHIP SHAFT LINE

A. A. Halyavkin¹, A. Ya. Auslender²

¹ — LLC Gazprom dobycha Astrakhan, Astrakhan, Russian Federation

² — Astrakhan state university, Astrakhan, Russian Federation

In work influence of coefficient of rigidity of deadwood bearings on operability of the ship shaft line is investigated. The existing values of coefficient of rigidity used when calculating cross fluctuations and when centering the ship shaft line are analyzed. It is specified that the ship shaft line represents very difficult dynamic system as works at action and emergence of constant, variable, cyclic and casual loadings. His design is various and depend on many factors including arrangements of the main propulsion plant. Influence of coefficient of rigidity on value of own frequency of cross fluctuations of a rowing shaft is investigated. The settlement scheme represents a beam of constant section, and leans on one pivotally - a motionless and elastic support with the concentrated loading on the end. The elastic support in the settlement scheme models the fodder deadwood bearing, the concentrated loading - the rowing screw. In work the statement is taken into account that in the settlement scheme it is enough to consider only his rowing part as this part of the ship shaft line is the most loaded and has the lowest own frequency. A rowing part of the shaft line includes the rowing screw, the console of a rowing shaft, the fodder deadwood bearing and a nasal part of a rowing shaft or a part of an intermediate shaft (depending on a shaft line design). It is specified in work that calculation of cross fluctuations of the ship shaft line is obligatory at his design as the arrangement of support and the rowing screw, length of deadwood bearings, the geometrical sizes of shaft and their connections among themselves of the shaft line is estimated. The purpose of calculation of cross fluctuations - determination of own frequency of the ship shaft line which 20...40% has to exceed the worker (bladed). The importance of coefficient of rigidity on own frequency when calculating cross fluctuations is estimated. The numerical value of coefficient of rigidity of fodder deadwood bearings of some types of vessel is presented. At a research of cross fluctuations was a number of the standard and regulating documents used at design, repair and operation ship the shaft line, his elements and the vessel in general is used.

Keywords: ship shaft line, deadwood bearing, rigidity coefficient, cross fluctuations, wear.

For citation:

Halyavkin, Alexey A., and Anna Ya. Auslender. "Assessment of influence of elastic properties of the fodder deadwood bearing on value of own frequency at linear cross fluctuations of the ship shaft line." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova* 10.5 (2018): 983–992. DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-5-983-992.

УДК 629.5.035.8

ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ УПРУГИХ СВОЙСТВ КОРМОВОГО ДЕЙДВУДНОГО ПОДШИПНИКА НА ЗНАЧЕНИЕ СОБСТВЕННОЙ ЧАСТОТЫ ПРИ ЛИНЕЙНЫХ ПОПЕРЕЧНЫХ КОЛЕБАНИЯХ СУДОВОГО ВАЛОПРОВОДА

А. А. Халявкин¹, А. Я. Ауслендер²

¹ — ООО «Газпром добыча Астрахань», Астрахань, Российская Федерация

² — ФГБОУ ВО «Астраханский государственный университет»,
Астрахань, Российская Федерация

В работе исследуется влияние коэффициента жесткости дейдвудных подшипников на работоспособность судового валопровода. Анализируются существующие значения коэффициента жесткости, используемые при расчете поперечных колебаний и центровке судового валопровода. Указывается,

что судовой валопровод представляет собой весьма сложную динамическую систему, так как работает под действием и при возникновении постоянных, переменных, циклических и случайных нагрузок. Его конструкция разнообразна и зависит от многих факторов, в том числе расположения главной энергетической установки. Исследуется влияние коэффициента жесткости на значение собственной частоты поперечных колебаний гребного вала. Расчетная схема представляет собой балку постоянного сечения и опирается на одну шарнирно-неподвижную и упругую опору с сосредоточенной нагрузкой на конце. Упругая опора в расчетной схеме моделирует кормовой дейдвудный подшипник, сосредоточенная нагрузка — гребной винт. В работе принято во внимание утверждение о том, что в расчетной схеме достаточно рассмотреть только его гребную часть, так как именно эта часть судового валопровода является наиболее нагруженной и имеет наименьшую собственную частоту. Гребная часть валопровода включает в себя гребной винт, консоль гребного вала, кормовой дейдвудный подшипник и носовую часть гребного вала или часть промежуточного вала (в зависимости от конструкции валопровода). В работе указывается, что расчет поперечных колебаний судового валопровода является обязательным при его проектировании, так как оценивается расположение опор и гребного винта, длина дейдвудных подшипников, геометрические размеры валов и их соединений между собой непосредственно валопровода. Цель расчета поперечных колебаний состоит в определении собственной частоты судового валопровода, которая на 20 ... 40 % должна превышать рабочую (лопастную). Оценивается значимость коэффициента жесткости на собственную частоту при расчете поперечных колебаний. Представлено численное значение коэффициента жесткости кормовых дейдвудных подшипников некоторых типов судов. При исследовании поперечных колебаний был использован ряд нормативных и регламентирующих документов, используемых при проектировании, ремонте и эксплуатации судового валопровода, его элементов и судна в целом.

Ключевые слова: судовой валопровод, дейдвудный подшипник, коэффициент жесткости, поперечные колебания, износ.

Для цитирования:

Халявкин А. А. Оценка влияния упругих свойств кормового дейдвудного подшипника на значение собственной частоты при линейных поперечных колебаниях судового валопровода / А. А. Халявкин, А. Я. Ауслендер // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2018. — Т. 10. — № 5. — С. 983–992. DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-5-983-992.

Введение (Introduction)

Обеспечение длительной и надежной работы двигательной установки судна, является в настоящее время, как правило, одной из самых актуальных задач отечественного судостроения. Это доказывает большое количество опубликованных научных работ, в которых предлагаются новые с механической или технологической точки зрения методы и идеи улучшения эксплуатационных характеристик. Одним их важных элементов двигательной установки является судовой валопровод.

Согласно ГОСТ 24154-80 [1], судовой валопровод является конструктивным комплексом, кинематически связывающим главный двигатель с движителем и предназначенным для передачи крутящих моментов и осевых нагрузок, возникающих при работе судовой двигательной установки (далее — движительная установка), составной частью которой он является.

По своим качественным характеристикам подшипники гребных валов подразделяются на подшипники скольжения (втулочного и планочного исполнения) и подшипники качения (с элементами в виде стержней, роликов, шариков и т. д.) с фланцевым и бесфланцевым исполнением; с жестким, самоустанавливающимся или амортизированным вариантом монтажа; с применением таких антифрикционных материалов, как резина, капролон, бакаут, текстолит, баббит и др. [2].

Судовой валопровод (рис. 1) представляет собой весьма сложную динамическую систему, так как работает под действием и при возникновении постоянных, переменных, циклических и случайных нагрузок. Его конструкция разнообразна и зависит от многих факторов, в том числе от расположения главной энергетической установки. Нарушение работоспособности судового валопровода приводит к снижению скорости хода или полной его потере, повышенной вибрации,

ускоренному износу и выхода из строя его элементов. Последующий ремонт в большинстве случаев требует вывода судна из эксплуатации и постановки его в док.

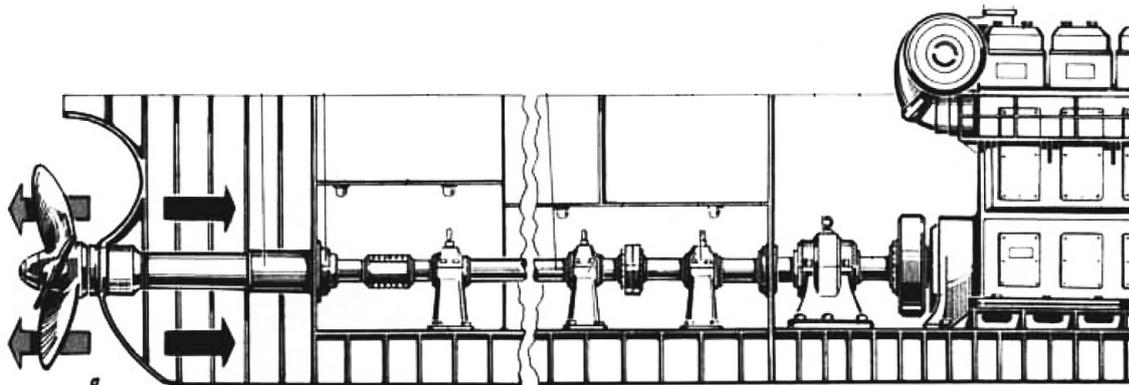


Рис. 1. Общий вид судового валопровода

При расчете поперечных колебаний или центровке судового валопровода стараются учесть упругие и механические свойства дейдвудных подшипников. Для этого в расчетной схеме балку постоянного по длине сечения располагают на упругих опорах [3] или упругом основании [4]–[6] с коэффициентом жесткости Н/м и Н/м². Срок эксплуатации судового валопровода зависит от рабочего состояния дейдвудных подшипников [13], которое характеризуется величиной износа δ самих дейдвудных подшипников.

В работе [6] при исследовании укладки гребных валов на дейдвудных опорах принимались значения коэффициента податливости для баббита $A = 0,2 \cdot 10^{-8}$ м/Н, для капролона — $A = 0,4 \cdot 10^{-8}$ м/Н, для резины — $A = 0,6 \cdot 10^{-8}$ м/Н. Так как коэффициент жесткости связан с коэффициентом податливости уравнением [3]:

$$k = \frac{1}{A}, \quad (1)$$

он будет иметь значения, соответственно: баббит — $k = 5 \cdot 10^8$ Н/м, капролон — $k = 2,5 \cdot 10^8$ Н/м, резина — $k = 1,7 \cdot 10^8$ Н/м.

В работе [6] при статическом расчете судового валопровода на упругом винклеровом основании принималось значение коэффициента жесткости капролона 500 МПа ($0,5 \cdot 10^9$ Н/м²). При исследовании поперечных колебаний судового валопровода также на упругом винклеровом основании в работах [4], [5] коэффициент жесткости капролона принимался равным 1–2 МПа (10^9 – $2 \cdot 10^9$ Н/м²). В указанных ранее работах отсутствует ссылка на источники и способы получения численного значения коэффициента жесткости материала дейдвудных подшипников.

В работах [7], [8] предлагается выражение для определения коэффициента жесткости:

$$k = \frac{\pi E d^2}{4h}, \quad (2)$$

где E — модуль упругости втулок дейдвудных подшипников; d — диаметр гребного вала с облицовочным покрытием; h — толщина стенки втулок дейдвудных подшипников.

В табл. 1 приведены коэффициенты жесткости k кормового дейдвудного подшипника для судов «Гидробиолог» и «Хазар-1». Материал втулок дейдвудных подшипников — капролон.

Таблица 1

Значение коэффициентов жесткости k дейдвудных подшипников

Название судна	E , Па	d_p , мм	Внешний диаметр втулки D , мм	h , мм	k , Н/м
«Гидробиолог»	$3 \cdot 10^9$	150	200	25	$2,19 \cdot 10^9$
«Хазар-1»	$3 \cdot 10^9$	131	170	19,5	$2,04 \cdot 10^9$

Во многих работах стараются учесть износ δ дейдвудных подшипников через коэффициент жесткости k . В связи с этим сформировалось мнение о том, что чем больше износ, тем ниже значение коэффициента жесткости:

$$\begin{aligned} \delta &= \min \rightarrow \max; \\ k &= \max \rightarrow \min. \end{aligned} \quad (3)$$

Безусловно, если рассматривать поперечные колебания судового валопровода, то имеется связь с износом δ втулок дейдвудных подшипников. Как указывается в работах [9], [10], с увеличением износа дейдвудных подшипников, особенно кормового, значение собственной частоты снижается. Безусловно, если рассматривать линейный закон изменения собственной частоты поперечных колебаний от увеличения износа, то форма изменения будет иметь параболический характер.

Расчет поперечных колебаний судового валопровода является обязательным при его проектировании [11], [12]. Оценивается расположение опор и гребного винта, длина дейдвудных подшипников, геометрические размеры валов и их соединений между собой самого валопровода и т. д. Целью расчета поперечных колебаний является определение собственной частоты судового валопровода, которая на 20 ... 40 % должна превышать рабочую (лопастную) [11]. Важно отметить, что поперечные колебания, так же, как и крутильные, подвергаются контролю со стороны Российского морского регистра судоходства при техническом осмотре и ремонте судов.

В многочисленных работах, посвященных расчёту поперечных колебаний валопроводов, отмечается, что в расчётной схеме достаточно рассмотреть только гребную часть валопровода, так как именно она является наиболее нагруженной и имеет наименьшую собственную частоту [11]–[13]. Гребная часть валопровода включает гребной винт, консоль гребного вала, кормовой дейдвудный подшипник и носовую часть гребного вала или часть промежуточного вала (в зависимости от конструкции валопровода).

Существует множество методов определения собственной частоты поперечных колебаний судового валопровода [14], среди которых следует выделить метод Ю. А. Шиманского, а также документы, устанавливающие правила и нормы проектирования валопроводов (например, РД 5.4307-79). Все они рассматривают судовой валопровод как балку ступенчато-постоянного сечения, опирающуюся на так называемые «точечные» (шарнирные) опоры. Поэтому основным недостатком является то, что в этих документах не учитываются упругие свойства дейдвудных подшипников при определении собственной частоты.

Методы и материалы (Methods and Materials)

Для сравнительного анализа влияния жесткости кормового дейдвудного подшипника на собственную частоту ω валопровода выполним его расчет на поперечные колебания. Расчетная схема представляет собой балку с изгибной жесткостью EJ , опирающуюся на шарнирно-неподвижную и упругую опоры с коэффициентом жесткости k , Н/м, соответственно (рис. 2).

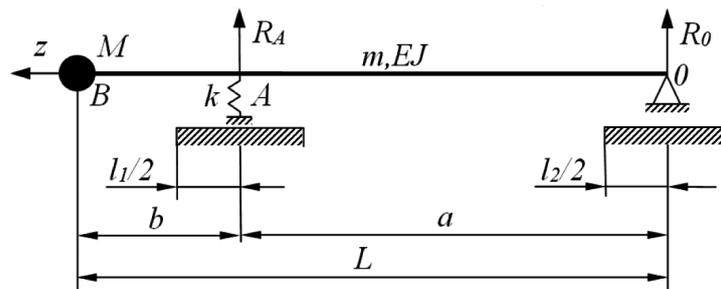


Рис. 2. Расчетная схема балки на упругой опоре:
 M — масса гребного винта; m — погонная масса гребного вала;
 R_0, R_A — реакции опор

Граничные условия для данной расчетной схемы примут вид:

$$y_{z=0} = 0; \left. \frac{d^2 y}{dz^2} \right|_{z=0} = 0;$$

$$\left. \frac{d^2 y}{dz^2} \right|_{z=L} = 0; M\omega^2 y_{z=L} = -EJ \left. \frac{d^3 y}{dz^3} \right|_{z=L}. \quad (4)$$

Дифференциальное уравнение свободных изгибных колебаний такой балки в каждом пролёте имеет вид [15]:

$$EJ \frac{d^4 \xi}{dz^4} + m \frac{d^2 \xi}{dt^2} = 0, \quad (5)$$

где ξ — поперечное смещение сечения балки;

z — координата сечения;

EJ — жесткость сечения при изгибе;

M — погонная масса балки.

Выполним решение уравнения (2):

$$\xi = y(z) \sin(\omega t + \varphi_c), \quad (6)$$

где y — амплитуда колебаний балки; ω — собственная частота; φ_c — сдвиг фаз (будем считать, что $\varphi_c = 0$).

Используя известные функции А. Н. Крылова, представленные в работе [15], находим общее решение уравнения (5):

$$y(z) = y_0 K_1(\alpha z) + \frac{\varphi_0}{\alpha} K_2(\alpha z) + \frac{M_0}{\alpha^2 EJ} K_3(\alpha z) + \frac{Q_0}{\alpha^3 EJ} K_4(\alpha z); \quad (7)$$

$$\alpha = \sqrt[4]{\frac{m\omega^2}{EJ}}, \quad (8)$$

где y_0, φ_0, M_0, Q_0 — соответственно амплитуды прогиба, угла поворота, изгибающего момента и поперечной силы при $z = 0$.

Функции А. Н. Крылова имеют вид:

$$K_1 = \frac{1}{2}(ch(\alpha z) + \cos(\alpha z)); K_2 = \frac{1}{2}(sh(\alpha z) + \sin(\alpha z)); \quad (9)$$

$$K_3 = \frac{1}{2}(ch(\alpha z) - \cos(\alpha z)); K_4 = \frac{1}{2}(sh(\alpha z) - \sin(\alpha z)).$$

и связаны между собой производными [4]:

$$\frac{d}{dz} K_1(\alpha z) = \alpha K_4(\alpha z); \frac{d}{dz} K_2(\alpha z) = \alpha K_1(\alpha z); \quad (10)$$

$$\frac{d}{dz} K_3(\alpha z) = \alpha K_2(\alpha z); \frac{d}{dz} K_4(\alpha z) = \alpha K_3(\alpha z);$$

На основании выражения (8) собственная частота будет иметь вид

$$\omega = \sqrt{\frac{\alpha^4 EJ}{m}}. \quad (11)$$

Найдем функцию прогибов для всех пролётов исследуемой балки расчетной схемы с учетом того, что при положительных перемещениях опорных сечений вниз реакция упругих опор направлена вверх и равна

$$R_A = -y_A k. \quad (12)$$

Функция амплитуды прогиба на первом участке ($0 \leq z \leq a$) имеет вид

$$y_I = \frac{f_0}{\alpha} K_2(\alpha z) + \frac{R_0}{\alpha^3 EJ} K_4(\alpha z). \quad (13)$$

При $z = a$ функцию (13) можно записать следующим образом:

$$y_a = \frac{\varphi_0}{\alpha} K_2(\alpha a) + \frac{R_0}{\alpha^3 EJ} K_4(\alpha a) = y_A. \quad (14)$$

Функция амплитуды прогиба на втором участке ($0 \leq z \leq L$) имеет вид

$$y_{II} = \frac{\varphi_0}{\alpha} K_2(\alpha z) + \frac{R_0}{\alpha^3 EJ} K_4(\alpha z) + \frac{R_A}{\alpha^3 EJ} K_4(\alpha(z-a)). \quad (15)$$

При $z = L$ уравнение (15) можно представить в виде

$$y_L = \frac{\varphi_0}{\alpha} K_2(\alpha L) + \frac{R_0}{\alpha^3 EJ} K_4(\alpha L) + \frac{R_A}{\alpha^3 EJ} K_4(\alpha(L-a)). \quad (16)$$

Исходя из функции (12), выражение (16) будет иметь вид

$$y_L = \frac{\varphi_0}{\alpha} K_2(\alpha L) + \frac{R_0}{\alpha^3 EJ} K_4(\alpha L) - \frac{y_A k}{\alpha^3 EJ} K_4(\alpha(z-a)). \quad (17)$$

Исходя из граничных условий, производные уравнения (17) запишем в виде:

$$\begin{cases} y'_L = \varphi_0 K_1(\alpha L) + \frac{R_0}{\alpha^2 EJ} K_3(\alpha L) - \frac{y_A k}{\alpha^2 EJ} K_3(\alpha(z-a)); \\ y''_L = \alpha \varphi_0 K_4(\alpha L) + \frac{R_0}{\alpha EJ} K_2(\alpha L) - \frac{y_A k}{\alpha EJ} K_2(\alpha(z-a)); \\ y'''_L = \alpha^2 \varphi_0 K_3(\alpha L) + \frac{R_0}{EJ} K_1(\alpha L) - \frac{y_A k}{EJ} K_1(\alpha(z-a)). \end{cases} \quad (18)$$

Запишем граничные условия (4) на левом конце расчетной схемы (в точке B):

$$\begin{cases} \frac{\varphi_0}{\alpha} K_2(\alpha a) + \frac{R_0}{\alpha^3 EJ} K_4(\alpha a) - y_A = 0; \\ M \omega^2 \left[\frac{\varphi_0}{\alpha} K_2(\alpha L) + \frac{R_0}{\alpha^3 EJ} K_4(\alpha L) - \frac{y_A k}{\alpha^3 EJ} K_4(\alpha(z-a)) \right] + \\ + \left[\alpha^2 \varphi_0 K_3(\alpha L) + \frac{R_0}{EJ} K_1(\alpha L) - \frac{y_A k}{EJ} K_1(\alpha(z-a)) \right] EJ = 0; \\ EJ \alpha \varphi_0 K_4(\alpha L) + \frac{R_0}{\alpha} K_2(\alpha L) - \frac{y_A k}{\alpha} K_2(\alpha(z-a)) = 0. \end{cases} \quad (19)$$

Согласно выражению (19), система уравнений примет вид:

$$\begin{cases} \frac{\varphi_0}{\alpha} K_2(\alpha a) + \frac{R_0}{\alpha^3 EJ} K_4(\alpha a) - y_A = 0; \\ \varphi_0 \left(\frac{\alpha^3 EJ M K_2(\alpha L)}{m} + \alpha^2 EJ K_3(\alpha L) \right) + R_0 \left(\frac{M}{m} \alpha K_4(\alpha L) + K_1(\alpha L) \right) - y_A \times \\ \times \left(k K_1(\alpha b) + k \frac{M}{m} \alpha K_4(\alpha b) \right) = 0; \\ \varphi_0 EJ \alpha K_4(\alpha L) + R_0 \frac{K_2(\alpha L)}{\alpha} - y_A \frac{k}{\alpha} K_2(\alpha b) = 0. \end{cases} \quad (20)$$

Условие существования ненулевого решения, как отмечалось ранее, для системы однородных уравнений (20) состоит в равенстве нулю её определителя:

$$\Delta = \begin{vmatrix} A_{11} & A_{12} & A_{13} \\ A_{21} & A_{22} & A_{23} \\ A_{31} & A_{32} & A_{33} \end{vmatrix} = 0, \quad (21)$$

где A_{ij} — коэффициенты при неизвестных значениях системы уравнений (20).

Далее вычисляется значение величины α , входящей в функции А. Н. Крылова, при которой определитель систем равен нулю. Для этого строится график зависимости определителя Δ от значения α .

После определения α по уравнению (11) определяем угловую частоту балки:

$$p = \frac{\omega}{2\pi} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{EJ\alpha^4}{m}}, \quad (22)$$

где ω — циклическая частота, рад/с, связанная с обычной круговой частотой p , c^{-1} , зависимостью $\omega = 2\pi p$.

Определитель $\Delta_{\text{ШО}}$ системы уравнений при поперечных колебаниях балки на шарнирных опорах примет вид

$$\Delta_{\text{ШО}} = \begin{vmatrix} \frac{K_2(\alpha a)}{\alpha} & \frac{K_4(\alpha a)}{\alpha^3 EJ} & 0 \\ \frac{M\alpha^3 EJ K_2(\alpha L)}{m} + EJ K_3(\alpha L)\alpha^2 & \frac{M\alpha K_4(\alpha L)}{m} + K_1(\alpha L) & \frac{M\alpha K_4(\alpha L)}{m} + K_1(\alpha b) \\ EJ K_4(\alpha L)\alpha & \frac{K_2(\alpha L)}{\alpha} & \frac{K_2(\alpha b)}{\alpha} \end{vmatrix} = 0. \quad (23)$$

Для сравнительного анализа также рассмотрим поперечные колебания балки на двух шарнирных опорах. Общий вид расчетной схемы представлен на рис. 3.

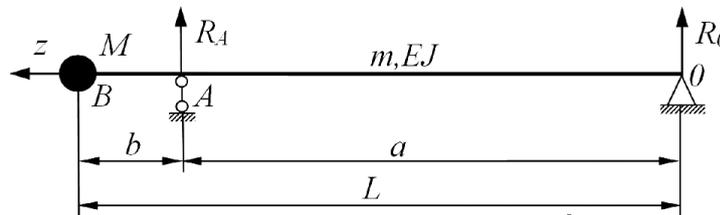


Рис. 3. Расчетная схема балки на шарнирных опорах

Определитель Δ_{YO} системы уравнений при поперечных колебаниях балки на одной шарнирной и одной упругой опорах будет иметь следующий вид:

$$\Delta_{\text{YO}} = \begin{vmatrix} \frac{K_2(\alpha a)}{\alpha} & \frac{K_4(\alpha a)}{\alpha^3 EJ} & -1 \\ \frac{M\alpha^3 EJ K_2(\alpha L)}{m} + EJ K_3(\alpha L)\alpha^2 & \frac{M\alpha K_4(\alpha L)}{m} + K_1(\alpha L) & -k \left(\frac{M\alpha K_4(\alpha L)}{m} + K_1(\alpha b) \right) \\ EJ K_4(\alpha L)\alpha & \frac{K_2(\alpha L)}{\alpha} & -\frac{k K_2(\alpha b)}{\alpha} \end{vmatrix} = 0. \quad (24)$$

Результаты (Results)

В табл. 2 указаны численные значения параметров судов согласно расчетной схеме (см. рис. 2) и значения собственной круговой частоты поперечных колебаний балки, которая опирается только на две шарнирные опоры.

Таблица 2

**Численное значение параметров судового валопровод
и собственной круговой частоты реальных судов**

Название судна	l_1 , мм	l_2 , мм	a , мм	b , мм	$d_{гр}$, мм	m , кг/м	M , кг	α , 1/м	p_1 , 1/с
«Гидробиолог»	500	500	2200	175	125	96,3	154	1382422	49,65
«Хазар-1»	520	220	2000	250	108	71,9	97	1,482537	49,34

В табл. 3 приведены численные значения собственной частоты при поперечных колебаниях валопроводов исследуемых судов с учетом изменения коэффициента жесткости упругой опоры расчетной схемы (см. рис. 1) в диапазоне $1 \cdot 10^6 \dots 5 \cdot 10^{10}$ Н/м.

Таблица 3

**Значения собственной частоты при поперечных колебаниях валопроводов судов
при различных коэффициентах жесткости**

№ п/п.	k , Н/м	«Гидробиолог»			«Хазар-1»		
		α , 1/м	p_1 , 1/с	p_2/p_1	α , 1/м	p_1 , 1/с	p_2/p_1
1	$1 \cdot 10^6$	0,61115	9,7	5,119	0,71557	11,5	4,29
2	$5 \cdot 10^6$	0,911908	21,61	2,298	1,06483	25,45	1,939
3	$1 \cdot 10^7$	1,08106	30,37	1,635	1,2583	35,54	1,388
4	$5 \cdot 10^7$	1,37659	49,24	1,008	1,48165	49,28	1
5	$1 \cdot 10^8$	1,38052	49,52	1,003	1,4822	49,32	1
6	$5 \cdot 10^8$	1,38228	49,6	1,001	1,4824	49,33	1
7	$1 \cdot 10^9$	1,3824	49,65	1	1,4825	49,34	1
8	$5 \cdot 10^9$	1,3824	49,65	1	1,48253	49,34	1
9	$1 \cdot 10^{10}$	1,3824	49,65	1	1,48256	49,34	1
10	$5 \cdot 10^{10}$	1,3824	49,65	1	1,48256	49,34	1

В соответствии с приведенными в табл. 3 значениями был построен график зависимости собственной частоты от коэффициента жесткости судна «Хазар-1» — рис. 4, откуда видно, что втулки дейдвудных подшипников исследуемых судов обладают достаточной жесткостью и сопротивляемостью действию на них внешних нагрузок.

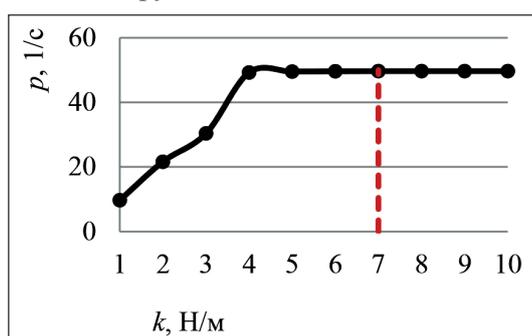


Рис. 4. График зависимости собственной частоты ω от коэффициента жесткости k

При коэффициенте жесткости $k = 1 \times 10^9$ Н/м упругой опоры собственная частота судового валопровода соответствует частоте поперечных колебаний на шарнирных опорах. Поэтому в большинстве случаев при расчете поперечных колебаний расчетная схема может представлять собой балку, которая опирается на шарнирные опоры. Полученные значения коэффициента жесткости втулок дейдвудных подшипников не оказывают особого влияния на численное значение собственной частоты линейных поперечных колебаний судового валопровода.

Заключение (Conclusion)

Проведенное в работе исследование линейных поперечных колебаний судового валопровода показало, что упругие свойства дейдвудных подшипников не отражают всей картины изменения собственной частоты. Рассматривать только упругие и механические свойства дейдвудного подшипника недостаточно. В расчетах необходимо учитывать отрыв валопровода от дейдвудного подшипника, характеризующий изменение жесткости вала с дейдвудным подшипником при поперечных колебаниях. Данный процесс усиливается при увеличении износа дейдвудных подшипников и действии внешних нагрузок, а также приводит к понижению собственной частоты и возникновению явления резонанса.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. ГОСТ 24154-80. Валопроводы судовые. Термины и определения. — Введ. с 01.07.80. — М.: Изд-во стандартов, 1980. — 4 с.
2. ОСТ 5.4474.0-91. Подшипники гребных валов судовых валопроводов. Общие технические условия. — Введ. 01.07.1992. — СПб.: Изд-во ЦНИИ «Лот», 1992. — 196 с.
3. Комаров В. В. Состояние укладки гребных валов на дейдвудных опорах / В. В. Комаров // Вестник Астраханского государственного технического университета. — 2006. — № 2 (31). — С. 259–267.
4. Миронов А. И. Метод оценки собственных частот валопровода судов / А. И. Миронов, Л. М. Денисова // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Морская техника и технология. — 2000. — С. 44–49.
5. Миронов А. И. Влияние дейдвудных подшипников на колебания валопроводов судов / А. И. Миронов, Л. М. Денисова // Вестник Астраханского государственного технического университета. — 2004. — № 1 (20). — С. 125–130.
6. Рубин М. Б. Подшипники в судовой технике: справ. / М. Б. Рубин, В. Е. Бахарева. — Л.: Судостроение, 1987. — 344 с.
7. Мамонтов В. А. Оценка влияния жесткости материала кормового дейдвудного подшипника на работоспособность судового валопровода / В. А. Мамонтов, А. А. Халявкин, Г. А. Кушнер, И. О. Разов // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Морская техника и технология. — 2017. — № 4. — С. 80–87.
8. Halyavkin A. Determination of stiffness coefficient of stern shaft bearing / A. Halyavkin, I. Razov, V. Mamontov, G. Kushner // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. — IOP Publishing, 2017. — Vol. 90. — Is. 1. — Pp. 012078. DOI: 10.1088/1755-1315/90/1/012078.
9. Яценко В. С. Эксплуатация судовых валопроводов / В. С. Яценко. — М.: Транспорт, 1968. — 171 с.
10. Grebe E. Experimental research about friction and wear of antifricition materials for port's/coastal and maritime machinery or equipment and analysis of parametric oscillations of ships shafting with new composite stern-tube bearings / E. Grebe, D. V. Loshadkin, G. A. Kushner, A. A. Haljavkin, A. A. Dudanov // Proceedings of 19th International Marine Industries Conference (MIC 2017). — Kish Island, Iran, 2017.
11. Румб В. К. Основы проектирования и расчета судового валопровода: учеб. пособие / В. К. Румб. — СПб.: Изд. центр СПбГМТУ, 1996. — 106 с.
12. Абрамович Б. Г. Уточнение метода расчёта изгибных колебаний судовых валопроводов / Б. Г. Абрамович, В. А. Меркулов // Судостроение. — 1977. — № 1. — С. 35–39.
13. Jia X. Analysis of the flexural vibration of ship's tail shaft by transfer matrix method / X. Jia, S. Fan // Journal of Marine Science and Application. — 2008. — Vol. 7. — Is. 3. — Pp. 179–183. DOI: 10.1007/s11804-008-8016-6.
14. Šestan A. A study into resonant phenomena in the catamaran ferry propulsion system / A. Šestan, N. Vladimir, N. Vulić, V. Ljubenkov // Transactions of FAMENA. — 2012. — Vol. 36. — Is. 1. — Pp. 35–44.
15. Бидерман В. Л. Теория механических колебаний / В. Л. Бидерман. — М.: Высш. школа, 1980. — 408 с.

REFERENCES

1. Russian Federation. State Standard GOST 24154-80. Valoprovody sudovye. Terminy i opredeleniya. M.: Izd-vo standartov, 1980.

2. Russian Federation. Industry standard OST 5.4474.0-91. Podshipniki grebnykh valov sudovykh valoprovodov. Obshchie tekhnicheskie usloviya. Spb.: Izd-vo TsNII «Lot», 1992.
3. Komarov, V. V. “The condition of propeller shafts placing on stern-tube supports.” *Vestnik of Astrakhan state technical university* 2(31) (2006): 259–267.
4. Mironov, A. I., and L. M. Denisova. “Metod otsenki sobstvennykh chastot valoprovoda sudov.” *Vestnik Astrakhanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya: Morskaya tekhnika i tekhnologiya* X (2000): 44–49.
5. Mironov, A. I., and L. M. Denisova. “Vliyanie deidvudnykh podshipnikov na kolebaniya valoprovodov sudov.” *Vestnik of Astrakhan state technical university* 1(20) (2004): 125–130.
6. Rubin, M. B., and V. E. Bakhareva. *Podshipniki v sudovoi tekhnike: Spravochnik*. L.: Sudostroenie, 1987.
7. Mamontov, Victor Andreevich, Alexey Aleksandrovich Haljavkin, Guriy Alekseevich Kushner, and Igor Olegovich Razov. “Assessment of impact of stern bearing material rigidness onto operability of the ship shaft line.” *Vestnik of Astrakhan State Technical University. Series: Marine Engineering and Technologies* 4 (2017): 80–87. DOI: 10.24143/2073-1574-2017-4-80-87
8. Halyavkin, Aleksey, I. Razov, V. Mamontov, and G. Kushner. “Determination of stiffness coefficient of stern shaft bearing.” *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. Vol. 90. No. 1. IOP Publishing, 2017. 012078. DOI: 10.1088/1755-1315/90/1/012078
9. Yatsenko, V. S. *Ekspluatatsiya sudovykh valoprovodov*. M.: Transport, 1968.
10. Grebe, E., D. V. Loshadkin, G. A. Kushner, A. A. Haljavkin, and A. A. Dudanov. “Experimental research about friction and wear of antifriction materials for port’s/coastal and maritime machinery or equipment and analysis of parametric oscillations of ships shafting with new composite stern-tube bearings.” *Proceedings of 19th International Marine Industries Conference (MIC 2017)*. Kish Island, Iran, 2017.
11. Rumb, V. K. *Osnovy proektirovaniya i rascheta sudovogo valoprovoda: ucheb.posobie*. SPb.: Izd.tsentr SPbGMTU, 1996.
12. Abramovich, B. G., and V. A. Merkulov. “Utochnenie metoda rascheta izgibnykh kolebaniy sudovykh valoprovodov.” *Sudostroenie* 1 (1977): 35–39.
13. Jia, Xiao-jun, and Shi-dong Fan. “Analysis of the flexural vibration of ship’s tail shaft by transfer matrix method.” *Journal of marine science and application* 7.3 (2008): 179–183. DOI: 10.1007/s11804-008-8016-6
14. Šestan, Ante, Nikola Vladimir, Nenad Vulić, and Boris Ljubenkov. “A study into resonant phenomena in the catamaran ferry propulsion system.” *Transactions of FAMENA* 36.1 (2012): 35–44.
15. Biderman, V. L. *Teoriya mekhanicheskikh kolebaniy*. M.: Vysshaya shkola, 1980.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Халявкин Алексей Александрович — кандидат технических наук, ведущий инженер-технолог ООО «Газпром добыча Астрахань» 414000, Российская Федерация, Астрахань, ул. Ленина, 30 e-mail: sopromat112@mail.ru
Ауслендер Анна Яковлевна — ассистент ФГБОУ ВО «Астраханский государственный университет» 414056, Российская Федерация, Астрахань, ул. Татищева, 20a e-mail: auslender.anna@mail.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Halyavkin, Alexey A. — PhD, Leading process engineer LLC Gazprom добыча Astrakhan 30 Lenina Str., Astrakhan, 414000, Russian Federation e-mail: sopromat112@mail.ru
Auslender, Anna Ya. — assistant Astrakhan State University 20a Tatishcheva Str., Astrakhan, 414056, Russian Federation e-mail: auslender.anna@mail.ru

Статья поступила в редакцию 4 сентября 2018 г.
Received: September 4, 2018.

DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-5-993-1003

MODELING OF EDGES OF OPENINGS IN CASES OF OBJECTS OF UNDERWATER SHIPBUILDING

S. A. Rusanovskiy, M. P. Khudyakov, N. I. Cherenkov

Branch of Northern (Arctic) Federal University named after M. V. Lomonosov in Severodvinsk, Severodvinsk, Russian Federation

By the construction of modern objects of underwater shipbuilding there is a critical question of increase in accuracy of welding of various designs in the strong case. First of all preparation of edges of openings in the strong case strongly influences accuracy. In view of the big thickness of case designs and any provisions of the welded objects the surface of cutting of an opening under welding has irregular shape. Application of curvilinear cutting under welding, characteristic of other industries in similar tasks, in shipbuilding is not used owing to technological problems by processing. Opening and processing of openings are made on a building berth in the manually that determines the low accuracy of production. When determining geometry of cutting methods of descriptive geometry are applied. One of the ways that allows to increase cardinally the accuracy of production of openings is application of mobile technological complexes with numerical program control. However the lowered rigidity is characteristic of them in comparison with stationary machines, usually applied to machining. Effective application of mobile technological complexes with numerical program control requires the mathematical description of a surface of cutting of edges of openings under welding. In article typification of openings is considered and categories of openings are entered depending on situation them concerning the surface of the case. The class and a type of a surface of cutting of openings under welding is defined. Standard requirements of standard literature to the accuracy of production of openings are considered. The general equation of a surface of an edge of a facet is defined. Main types of orientation of welded saturation of rather main strong case are chosen. As an example the problem of crossing of two cylinders (the strong case and the flange of saturation) is solved and options of turn of the small cylinder of rather basic coordinate axes are considered.

Keywords: objects of underwater shipbuilding, pressure hull, welding of flanges, edge of openings, ruled surface, crossing of cylinders.

For citation:

Rusanovskiy, Sergey A., Mikhail P. Khudyakov, and Nikolai I. Cherenkov. "Modeling of edges of openings in cases of objects of underwater shipbuilding." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 10.5 (2018): 10.21821/2309-5180-2018-10-5-993-1003.

УДК 629.128

МОДЕЛИРОВАНИЕ ФОРМООБРАЗОВАНИЯ КРОМОК ОТВЕРСТИЙ В КОРПУСАХ ОБЪЕКТОВ ПОДВОДНОГО КОРАБЛЕСТРОЕНИЯ

С. А. Русановский, М. П. Худяков, Н. И. Черенков

Филиал ФГАУ ВО «Северного (Арктического) федерального университета имени М. В. Ломоносова» в г. Северодвинске, Северодвинск, Российская Федерация

При постройке современных объектов подводного кораблестроения остро встает вопрос повышения точности сварки различных конструкций в прочный корпус. В первую очередь на точность изготовления оказывает большое влияние подготовка кромок отверстий в прочном корпусе. Ввиду большой толщины корпусных конструкций и произвольного положения свариваемых объектов, поверхность разделки отверстия под сварку имеет сложную форму. Применение криволинейной разделки под сварку, характерной для других отраслей промышленности в подобных задачах, в кораблестроении не используется вследствие технологических проблем при обработке. Вскрытие и обработку отверстий производят вручную, что определяет низкую точность изготовления. При определении размерных параметров разделки применяются методы начертательной геометрии. Одним из способов, позволяющих кардинально повысить точность изготовления отверстий, является применение мобильных технологических комплексов с числовым программным управлением. Однако для них характерна пониженная жесткость по сравнению со стационарными станками, обычно применяемыми для механической обработки. Для эффективно-

го применения мобильных технологических комплексов с числовым программным управлением требуется математическое описание поверхности разделки кромок отверстий под сварку. В статье рассмотрена типизация отверстий и вводятся категории отверстий в зависимости от положения их относительно поверхности корпуса. Определен класс и вид поверхности разделки отверстий под сварку. Рассмотрены типовые требования нормативной литературы к точности изготовления отверстий. Определено общее уравнение поверхности кромки фаски. Выбраны основные виды ориентации вварного насыщения относительно основного прочного корпуса. В качестве примера решена задача пересечения двух цилиндров (прочный корпус и фланец насыщения) и рассмотрены варианты поворота малого цилиндра относительно базовых координатных осей.

Ключевые слова: объекты подводного кораблестроения, прочный корпус, вварка насыщения, кромка отверстия, линейчатая поверхность, пересечение цилиндров.

Для цитирования:

Русановский С. А. Моделирование формообразования кромок отверстий в корпусах объектов подводного кораблестроения / С. А. Русановский, М. П. Худяков, Н. И. Черенков // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2018. — Т. 10. — № 5. — С. 10.21821/2309-5180-2018-10-5-993-1003.

Введение (Introduction)

Повышенные требования к техническим характеристикам и задачи внедрения новых прогрессивных технологий вызывают необходимость применения при изготовлении корпусов подводных лодок (ПЛ) современных средств автоматизации производства и робототехники [1]. Одним из «узких мест» в процессе производства ПЛ является комплекс работ по вварке в прочный корпус различного насыщения. Как правило, элементы насыщения имеют форму кругового цилиндра различного диаметра под вварку в корпус. Анализ корпусной спецификации объектов подводного кораблестроения показывает, что на одном объекте под вварку насыщения вскрывается более 500 отверстий диаметром больше 100 мм, расположенных в разных пространственных положениях [2]. Большая часть отверстий расположена по нормали к обшивке. Порядка 20 % из них (около 100 единиц) имеют другие варианты ориентации оси отверстий относительно базовых корабельных координатных плоскостей.

Особые сложности возникают при выполнении отверстий большого диаметра (диаметром от 0,3 м) в условиях, когда вскрытие и обработка этих отверстий производятся на уже собранном корпусе, что исключает возможность вскрытия с помощью стационарных программно-управляемых станков, и вскрытие производится ручным способом [3]. Помимо этого, согласно требованиям нормативных документов по подготовке кромок под сварку, кромки отверстий, расположенных по нормали к обшивке, описывались одним видом разделки кромок под сварку (рис. 1), остальные отверстия — двумя видами разделки (с различными сварочными узлами) — см. ГОСТ 5264-80 «Ручная дуговая сварка. Соединения сварные».

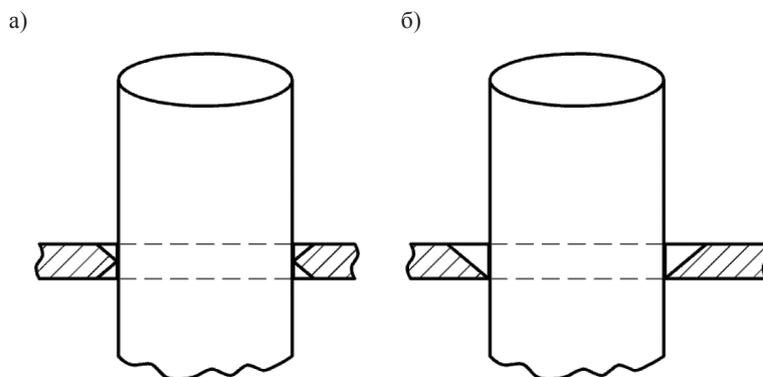


Рис. 1. Виды разделки: а — X-образная разделка; б — V-образная разделка

В общем виде подготовка кромок отверстий регламентирована ГОСТами, альбомами сварочных узлов, конструкторскими и технологическими инструкциями, в которых указаны следу-

ющие данные: геометрия разделки, способы ее построения и методы контроля. Типовые требования к точности обработки фаски кромок под сварку следующие: отклонение линии начала фаски «гребешка» от своего положения $0 \dots +2$ мм. Допуск на угол фаски зависит от вида подготовки (механическим или тепловым способом) и колеблется от 1° (для механической обработки) до 5° (при тепловой резке). В целом требования к точности подготовки кромок под сварку типичные для судовых корпусных конструкций и на порядок менее строгие по сравнению с требованиями для функциональных поверхностей изделий общего машиностроения. Однако и эти требования не всегда удается выполнить, особенно, если работы проводятся в условиях стапеля.

Методы и материалы (Methods and Materials)

Технология выполнения отверстий в корпусе и подготовка разделки отверстия под сварку может быть различной в зависимости от вида производства. Например, сначала в корпусе для прохода насыщения выполняется вырез, затем по периметру выполненного отверстия снимаются фаски для разделки требуемой формы. Такой способ подготовки отверстий под сварку соответствует применяемому в настоящее время ручному производству [4]. При использовании средств автоматизации производства возможно и предпочтительно производить вскрытие отверстий с одновременной разделкой кромок под сварку. Успешное внедрение средств автоматизации технологической подготовки при механической обработке корпусных конструкций в рамках конкретных производственных условий требует формализованного представления обрабатываемых поверхностей, пригодного для использования на специализированном оборудовании с числовым программным управлением.

Рассмотрим геометрию кромок отверстия при прямолинейной разделке кромок под сварку, при этом уточним, что при V -образной разделке будет одна поверхность, а при X -образной разделке — две взаимопересекающиеся поверхности одного вида. Для отверстий рассматриваемого типа характерно также совместное использование V - и X -образной разделки [5]. В достаточно общем виде поверхность разделки кромки отверстия может быть представлена в виде поверхности двоякой кривизны (криволинейная разделка). Для достижения технологичности и с учетом требований нормативной документации необходимо, чтобы эта поверхность являлась *линейчатой*. В случае сварки в корпус ПЛ деталей насыщения цилиндрической формы естественным решением представляется выбор формы фаски в виде поверхности дважды косо цилиндрида, образованного движением прямой l вдоль двух криволинейных направляющих: $P'(\theta)$ и $P''(\theta)$, где θ — некоторый параметр [6]. Естественно принять в качестве линейной направляющей ось цилиндра насыщения, а криволинейные направляющие расположить на обшивке корпуса так, чтобы они образовывали границы фаски (рис. 2).

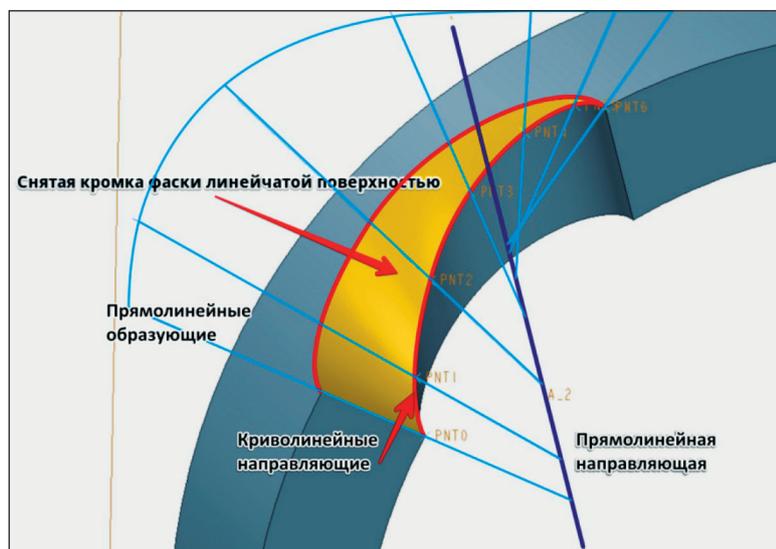


Рис. 2. Поверхность разделки на дважды косо цилиндриде

Так как криволинейные направляющие $P'(\theta)$ и $P''(\theta)$ расположены вокруг цилиндра ввариваемого комингса насыщения, положение точек на них при описании косоугольного цилиндрикоиды может задаваться углом θ , который образует проекция радиус-вектора точек линейчатой поверхности на плоскость, перпендикулярную оси цилиндра насыщения с некоторым начальным положением этой проекции (рис. 3).

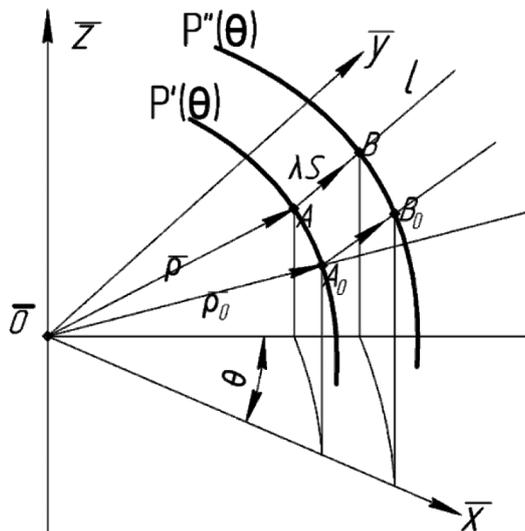


Рис. 3. Пояснение записи векторного уравнения дважды косоугольного цилиндрикоиды

В этом случае векторное уравнение линейчатой поверхности имеет вид

$$\vec{r}_1(\theta, \lambda) = \vec{\rho}(\theta) + \lambda \vec{S}(\theta), \quad (1)$$

где θ — параметр, определяющий положение плоскости, в которой лежит прямая l , соединяющая точки A и B на кривых $P'(\theta)$ и $P''(\theta)$; $S(\theta)$ — единичный вектор, задающий направление образующей прямой l , проходящей через точки A и B на кривых $P'(\theta)$ и $P''(\theta)$ и ось z ; λ — параметр, определяющий положение произвольной точки на образующей прямой l , проходящей через точки A , B и ось \vec{Oz} ; $\vec{\rho}(\theta)$ — радиус-вектор точки A в системе координат \vec{Oxyz} , связанной с цилиндром насыщения.

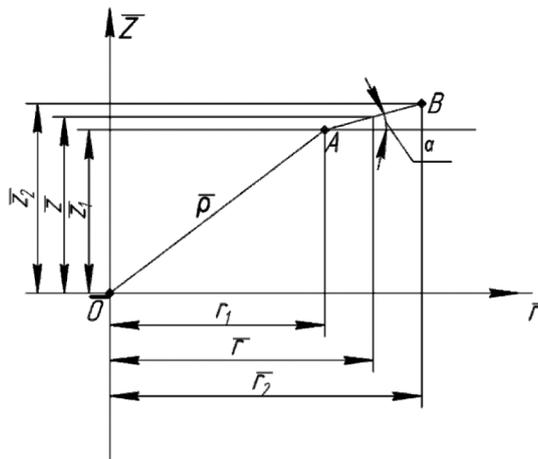


Рис. 4. Построение к получению уравнения прямолинейной образующей

Так как образующая прямая l лежит в плоскости, определяемой углом θ , проходящей через ось z , уравнение прямой, проходящей через любые точки A и B на криволинейных образующих (рис. 4), можно представить в виде

$$\bar{z} = z_1 + (r - r_1) \tan \alpha = \bar{z}_1 + (r - r_1) \frac{\bar{z}_2 - \bar{z}_1}{r_2 - r_1}, \quad (2)$$

где $r = \sqrt{\bar{x}^2 + \bar{y}^2}$, $r_1 = \sqrt{x_1^2 + y_1^2}$, $r_2 = \sqrt{x_2^2 + y_2^2}$.

Окончательно уравнение для задания прямой образующей имеет следующий вид:

$$\bar{z} = \bar{z}_1 + \left(\sqrt{\bar{x}^2 + \bar{y}^2} - \sqrt{x_1^2 + y_1^2} \right) \frac{\bar{z}_2 - \bar{z}_1}{\sqrt{x_2^2 + y_2^2} - \sqrt{x_1^2 + y_1^2}}. \quad (3)$$

Результаты (Results)

Для получения уравнений криволинейных образующих $P'(\theta)$ и $P''(\theta)$ линейчатой поверхности необходимо рассмотреть задачу пересечения цилиндра, задающего положение ввариваемой детали с обшивкой прочного корпуса (ПК). При этом ПК может состоять из цилиндрических, конических и сферических участков. Введем типизацию получаемых при пересечении отверстий в зависимости от расположения оси ввариваемого цилиндра относительно обшивки ПК и корабельной системы координат.

Предусмотрены следующие места расположения оси отверстия на цилиндрических, конических и сферических участках корпусных конструкций:

- на цилиндрических поверхностях в плоскостях, параллельных плоскости мидель-шпангоута (перпендикулярно основной плоскости и под углом к ней);
- на цилиндрических поверхностях в плоскостях, параллельных диаметральной плоскости;
- на конусном переходе в диаметральной плоскости (ДП) и плоскостях, повернутых относительно оси OX на произвольный угол;
- на сферической переборке в ДП и плоскостях, повернутых относительно оси OX на произвольный угол;
- по нормали к обшивке (на цилиндрических, конических и сферических участках корпусных конструкций);
- произвольным образом (на цилиндрических, конических и сферических участках корпусных конструкций);

Пусть даны два круговых цилиндра разного диаметра, один из которых (с меньшим радиусом) соответствует цилиндру насыщения, а другой (с большим радиусом) относится к прочному корпусу ПЛ, при этом ось малого цилиндра перпендикулярна основной плоскости и отстоит от ДП на расстоянии a (рис. 5). Введем корабельную систему координат $Oxyz$: ось Ox направлена по оси большого цилиндра (прочного корпуса ПЛ) из кормы в нос, ось Oy направлена на левый борт, ось Oz перпендикулярна первым двум и направлена вверх [7].

В общей системе координат $Oxyz$ уравнение большого цилиндра имеет вид

$$y^2 + z^2 = R_1^2 \quad \text{при } -\infty < x < \infty. \quad (4)$$

В той же системе координат уравнение малого цилиндра при наложенных выше ограничениях запишется следующим образом:

$$x^2 + (y - a)^2 = R_2^2 \quad \text{при } -\infty < z < \infty. \quad (5)$$

Для определенности $R_1 > R_2$, a — координата точки пересечения оси малого цилиндра с плоскостью xOy по оси Oy , т. е. $a = y_{O1}$.

Найдем линию пересечения цилиндров. Для удобства введем местную систему координат, связанную с меньшим цилиндром $O_1\bar{x}\bar{y}\bar{z}$ (рис. 5). За центр системы координат примем точку O_1 , находящуюся на пересечении оси этого цилиндра с плоскостью xOy общей системы координат. Ось $O_1\bar{z}$ направим вдоль оси, т. е. в направлении оси Oz , а оси $O_1\bar{x}$ и $O_1\bar{y}$ — в направлении осей Ox и Oy соответственно. Таким образом, связь между системами координат $Oxyz$ и $O_1\bar{x}\bar{y}\bar{z}$ описывается соотношениями:

$$\bar{x} = x; \bar{y} = y - a; \bar{z} = z. \quad (6)$$

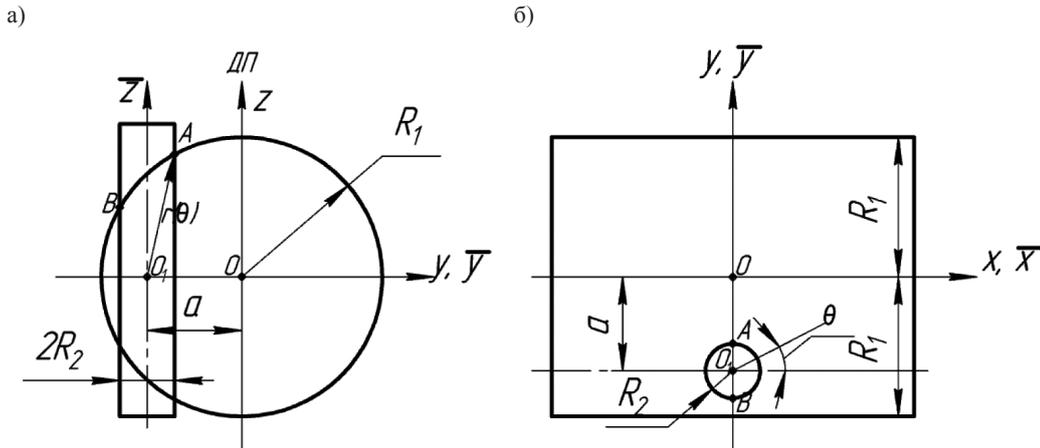


Рис. 5. Пересечение двух цилиндров:
а — вид спереди; б — вид сверху

В местной системе координат $O_1\bar{x}\bar{y}\bar{z}$ положение точки пересечения цилиндров задается концом вектора $r(\theta)$, где параметр θ характеризует его движение вдоль линии пересечения. В качестве параметра θ можно принять угол между осью $O_1\bar{x}$ и проекцией вектора $r(\theta)$ на плоскость $\bar{x}O_1\bar{y}$. Координаты конца вектора $\bar{x}(\theta)$, $\bar{y}(\theta)$, $\bar{z}(\theta)$ будут определять параметрическое уравнение линии пересечения цилиндров. Координаты $\bar{x}(\theta)$ и $\bar{y}(\theta)$, как видно из рис. 5, б, будут:

$$\bar{x}(\theta) = R_2 \cos \theta; \bar{y}(\theta) = R_2 \sin \theta. \quad (7)$$

Для определения $\bar{z}(\theta)$ воспользуемся уравнением (4), выразив предварительно общие координаты через местные по формулам:

$$x = \bar{x}; y = \bar{y} + a; z = \bar{z}. \quad (8)$$

Тогда имеем

$$(\bar{y} + a)^2 + \bar{z}^2 = R_1^2$$

и с учетом, что $\bar{y}(\theta) = R_2 \sin \theta$, можно записать

$$\bar{z} = \pm \sqrt{R_1^2 - (R_2 \sin \theta + a)^2}. \quad (9)$$

Объединив формулы (7) и (9), получим параметрическое уравнение линии пересечения рассматриваемых цилиндров в местной системе координат:

$$\begin{aligned} \bar{x}(\theta) &= R_2 \cos \theta; \\ \bar{y}(\theta) &= R_2 \sin \theta; \end{aligned} \quad (10)$$

$$\bar{z}(\theta) = \pm \sqrt{R_1^2 - (R_2 \sin \theta + a)^2}.$$

Уравнения линии пересечения рассматриваемых цилиндров в общей системе координат:

$$\begin{aligned} x(\theta) &= R_2 \cos \theta; \\ y(\theta) &= R_2 \sin \theta + a; \end{aligned} \quad (11)$$

$$z(\theta) = \pm \sqrt{R_1^2 - (R_2 \sin \theta + a)^2}.$$

Рассмотрим два варианта поворота малого цилиндра:

- относительно оси OX ;
- относительно оси OY .

Ось малого цилиндра находится в плоскости yOz , образует с осью Oz угол α и пересекается с плоскостью xOy в точке с координатами $(0; c)$.

Вводим вспомогательную систему координат $Ox'y'z'$, начало которой совпадает с началом общей системой координат, т. е. с точкой O , а плоскость $x'Oy'$ перпендикулярна оси малого цилиндра. Её связь с местной системой координат $O\bar{x}\bar{y}\bar{z}$ и общей системой координат $OXYZ$ определяется соотношениями (рис. 6):

$$x' = \bar{x}; y' = \bar{y} + a; z' = \bar{z}; \quad (12)$$

$$x = x', y = y' \cos \alpha - z' \sin \alpha, z = y' \sin \alpha + z' \cos \alpha. \quad (13)$$

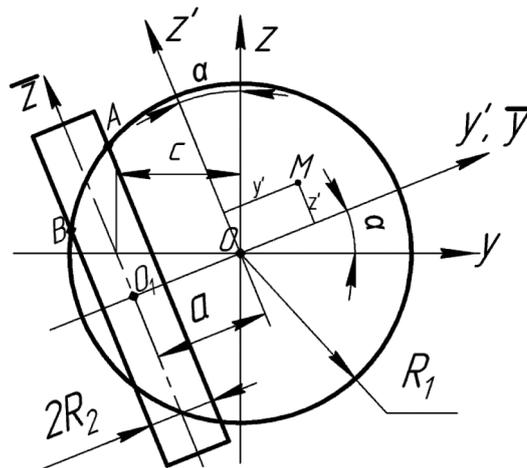


Рис. 6. Пересечение двух цилиндров, малый под углом наклона к диаметральной плоскости

Координата a , определяющая отстояние точки пересечения оси малого цилиндра с плоскостью $x'Oy'$ от начала координат этой системы, определяется в виде

$$a = c \cdot \cos \alpha, \quad (14)$$

Зависимости (12) позволяют свести данную задачу к рассматриваемой ранее.

С учетом уравнения (10) получим уравнения линии пересечения в системе координат $Ox'y'z'$:

$$x' = R_2 \cos \theta;$$

$$y' = R_2 \sin \theta + a;$$

$$z' = \sqrt{R_1^2 - (R_2 \sin \theta + a)^2}. \quad (15)$$

Подставляя уравнения (15) в уравнения (13), найдем уравнения пересечения цилиндров в общей системе координат $Oxyz$:

$$x = R_2 \cos \theta;$$

$$y = R_2 (\sin \theta + a) \cos \alpha - \sqrt{R_1^2 - (R_2 \sin \theta + a)^2} \sin \alpha; \quad (16)$$

$$z = R_2 (\sin \theta + a) \sin \alpha + \sqrt{R_1^2 - (R_2 \sin \theta + a)^2} \sin \alpha.$$

Заметим, что переход от системы координат $Ox'y'z'$ к системе координат $Oxyz$ выполняется поворотом вокруг Ox и может быть осуществлён через матрицу преобразования координат:

$$\begin{Bmatrix} x \\ y \\ z \end{Bmatrix} = [A]_x \begin{Bmatrix} x' \\ y' \\ z' \end{Bmatrix}, \quad (17)$$

где $[A]_x = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \alpha & -\sin \alpha \\ 0 & \sin \alpha & \cos \alpha \end{bmatrix}$.

Вариант поворота малого цилиндра относительно оси yOz .

Ось малого цилиндра находится в плоскости, параллельной плоскости $x''Oz''$, и образует с осью z угол β (рис. 7).

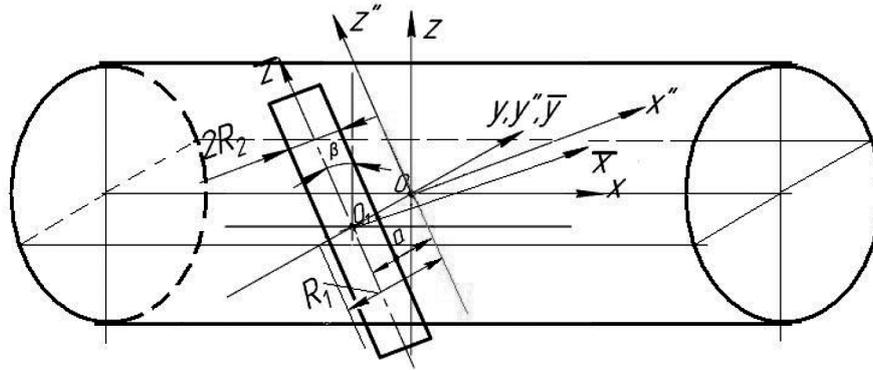


Рис. 7. Положение пересекающихся цилиндров в рассматриваемых системах координат (малый цилиндр под углом наклона к плоскости мидель-шпангоута)

Вводим вспомогательную систему координат $Ox''y''z''$, начало которой совпадает с O , а плоскость $x''Oy''$ перпендикулярна оси малого цилиндра. Уравнения связи координат:

$$x'' = \bar{x}; y'' = \bar{y} + a; z'' = \bar{z}; \tag{18}$$

$$x = x'' \cos \beta + z'' \sin \beta; y = y''; z = -x'' \sin \beta + z'' \cos \beta; \tag{19}$$

Уравнения линии пересечения цилиндров в системе координат $Ox''y''z''$ аналогичны уравнениям (11) или (15):

$$\begin{aligned} x'' &= R_2 \cos \theta; \\ y'' &= R_2 \sin \theta + a; \\ z'' &= \sqrt{R_1^2 - (R_2 \sin \theta + a)^2}. \end{aligned} \tag{20}$$

Уравнения линии пересечения в общей системе координат $Oxyz$ получаются подстановкой уравнения (20) в уравнение (19) или с помощью матрицы поворота системы координат $Ox''y''z''$ относительно оси Oy на угол β :

$$\begin{Bmatrix} x \\ y \\ z \end{Bmatrix} = [A]_y \begin{Bmatrix} x'' \\ y'' \\ z'' \end{Bmatrix}, \tag{21}$$

где $[A]_y = \begin{bmatrix} \cos \beta & 0 & \sin \beta \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \beta & 0 & \cos \beta \end{bmatrix}$.

Обсуждение (Discussion)

В общем случае дважды косою цилиндроид является поверхностью отрицательной гауссовой кривизны и не может быть развернут на плоскость без разрывов и складок. При рассмотрении поверхности на рассматриваемом участке разделки одна из кривизн поверхности близка к нулю.

Таким образом, ее, в принципе, можно аппроксимировать развертываемой поверхностью с определенными допущениями при соблюдении требований точности с запасом.

Рассматриваемую первую криволинейную направляющую также можно аппроксимировать с помощью сопряженных круговых дуг или с определенными допущениями [8], [9]. Полученные аналитические зависимости в матричной форме позволяют получать тривиальными преобразованиями как прямое, так и обратное решения задачи формообразования рассмотренных разделок. Это, в свою очередь, позволяет решать ряд оптимизационных задач, связанных с преодолением проблем производительности и точности подготовки отверстий под сварку ответственных деталей насыщения в корпус подводных аппаратов. В частности, появляется возможность использования всего потенциала мобильных технологических комплексов с программным управлением, в том числе с параллельной кинематикой [10]. На основе полученного решения оптимизировать процесс обработки можно не только обобщенно на всей поверхности разделки, но и на сколь угодно малых ее участках с учетом текущей жесткости технологической системы.

Полученные решения позволяют программировать не только обработку рассматриваемых поверхностей, но и автоматизировать контроль с помощью включаемых в состав технологического комплекса контрольно-измерительных устройств. Это становится возможным как на этапе подготовки обработки по реальной форме корпуса на обрабатываемом участке, так и после обработки, на этапе приемочного контроля.

После определения аналитических зависимостей поверхности разделки можно также рассмотреть вариант уменьшения сварочных деформаций корпусных конструкций путем сохранения постоянства площади поперечного сечения сварного шва с помощью изменения угла фаски с учетом технологичности сварочных операций [11].

Выводы (Results)

На основе выполненного исследования можно сделать следующие выводы:

1. Проанализирована номенклатура и дана классификация отверстий для сварки деталей насыщения в корпусах объектов подводного кораблестроения.
2. Предложено для формирования разделки под сварку деталей насыщения использовать линейчатые поверхности.
3. Определен класс линейчатых поверхностей и получено уравнение дважды косоугольного цилиндра для описания поверхности разделки под сварку.
4. Выявлена особенность поверхности дважды косоугольного цилиндра – на практически используемом участке она близка к поверхности с нулевой кривизной и может быть аппроксимирована развертываемыми поверхностями.
5. Показана возможность использования для задания кромок фасок линий пересечения цилиндра насыщения с обшивкой прочного корпуса.
6. Получены параметрические уравнения для описания линии пересечения цилиндра насыщения с обшивкой прочного корпуса при различной ориентации оси этого цилиндра относительно плоскостей корабельной системы координат.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Будниченко М. А. Модернизация конструкторско-технологической подготовки производства и процессов строительства кораблей / М. А. Будниченко, А. Ю. Спиридонов // Труды ЦНИИ им. акад. А. Н. Крылова. — 2015. — № 90 (374). — С. 187–194.
2. Шушарин Ф. Н. Атомные подводные лодки. Технология судостроения: в 5 ч. Ч. 1: Технология и организация постройки. Основные положения / Ф. Н. Шушарин, В. П. Бородин, Н. П. Власов, А. В. Власова, В. Г. Даценко. — Северодвинск: ФГУП «ПО «Севмашпредприятие»; Севмашвтуз, 2004. — 456 с.
3. Алферов В. И. Расчетная оценка объемов пригоночных работ при сборке монтажных соединений судовых корпусных конструкций на основе размерного анализа / В. И. Алферов // Судостроение. — 2010. — № 6 (793). — С. 48–52.

4. Шушарин Ф. Н. Атомные подводные лодки. Технология судостроения: в 5 ч. — Ч. 3: Технология и организация стапельно-сдаточных производств / Ф. Н. Шушарин, Р. А. Ануфриев, Е. И. Баев, Б. В. Борисов, В. П. Бородин [и др.]. — Северодвинск: ФГУП «ПО «Севмашпредприятие»; Севмашвтуз, 2004. — 503 с.
5. Русановский С. А. Вопросы формообразования кромок отверстий в цилиндрических оболочках / С. А. Русановский, М. П. Худяков, Н. И. Черенков // Научно-технические ведомости Севмашвтуза. — 2017. — № 3. — С. 23–27.
6. Кривошапко С. Н. Аналитические поверхности: материалы по геометрии 500 поверхностей и информация к расчету на прочность тонких оболочек / С. Н. Кривошапко, В. Н. Иванов, С. М. Халаби. — М.: Наука, 2006. — 544 с.
7. Князев Д. Н. Построение линии пересечения двух цилиндров в параметрическом виде / Д. Н. Князев, Е. С. Устинова // Технические науки в России и за рубежом: материалы IV Междунар. науч. конф. (г. Москва, янв. 2015 г.). — М.: Буки-Веди, 2015. — С. 122–125.
8. Агеев В. Н. Метод построения сопряженных круговых дуг / В. Н. Агеев // Научный вестник Московского государственного технического университета гражданской авиации. — 2017. — Т. 20. — № 2. — С. 126–134.
9. Yang X. Planar point set fairing and fitting by arc splines / X. Yang, G. Wang // Computer-Aided Design. — 2001. — Vol. 33. — Is. 1. — Pp. 35–43. DOI: 10.1016/S0010-4485(00)00059-2.
10. Веселков В. В. Принципы реализации и развития технологии автоматизированного изготовления корпусных конструкций / В. В. Веселков, М. А. Кобец // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2015. — № 1 (29). — С. 82–89. DOI: 10.21821/2309-5180-2015-7-1-82-89.
11. Алферов В. Д. Методы расчета сварочных деформаций и напряжений судовых корпусных конструкций: монография / В. Д. Алферов. — СПб.: ФГУП «Крыловский государственный научный центр», 2014. — 309 с.

REFERENCES

1. Budnichenko, Mikhail A., and Aleksandr Yu. Spiridonov. “Upgrading design & technological support of production and ship construction processes.” *Transactions of the Krylov State Research Centre* 90(374) (2015): 187–194.
2. Shusharin, F. N., V. P. Borodin, N. P. Vlasov, A. V. Vlasova, and V. G. Datsenko. *Atomnye podvodnye lodki. Tekhnologiya sudostroeniya: v 5-ti chastyakh. Ch. 1. Tekhnologiya i organizatsiya postroiki. Osnovnye polozheniya*. Severodvinsk: FGUP «PO«Sevmashpredpriyatie»; Sevmashtvuz, 2004.
3. Alforyov, V. I. “Estimated evaluation of fitting amount when assembling ship hull structures erection joints on the basis of dimensional analysis.” *Shipbuilding* 6(793) (2010): 48–52.
4. Shusharin, F. N., R. A. Anufriev, E. I. Baev, B. V. Borisov, V. P. Borodin, et al. *Atomnye podvodnye lodki. Tekhnologiya sudostroeniya: v 5-ti chastyakh. Ch. 3. Tekhnologiya i organizatsiya stapel'no - sdatochnyh proizvodstv*. Severodvinsk: FGUP «PO«Sevmashpredpriyatie»; Sevmashtvuz, 2004.
5. Rusanovsky, S. A., M. P. Khudyakov, and N. I. Cherenkov. “Questions of shape forming of the cushions of holes in cylindrical shells.” *Nauchno-tekhnicheskie vedomosti Sevmashtvuz* 3 (2017): 23–27.
6. Krivoshapko, S. N., V. N. Ivanov, and S. M. Halabi. *Analiticheskie poverhnosti: materialy po geometrii 500 poverhnostej i informatsiya k raschetu na prochnost' tonkih obolochek*. M.: Nauka, 2006.
7. Knyazev, D. N., and E. S. Ustinova. “Postroenie linii peresecheniya dvuh cilindrov v parametricheskom vide.” *Tekhnicheskie nauki v Rossii i za rubezhom: materialy IV Mezhdunar. nauch. konf. (g. Moskva, yanvar' 2015 g.)*. M.: Buki-Vedi, 2015. 122–125.
8. Ageyev, Vladimir N. “Method of conjugated circular arcs tracing.” *Civil Aviation High TECHNOLOGIES* 20.2 (2017): 126–134.
9. Yang, Xunnian, and Guozhao Wang. “Planar point set fairing and fitting by arc splines.” *Computer-Aided Design* 33.1 (2001): 35–43. DOI: 10.1016/S0010-4485(00)00059-2.
10. Veselkov, V. V. and M. A. Kobec. “Principles of realization and development of the technology of the automated manufacturing of hull constructions.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 1(29) (2015): 82–89. DOI: 10.21821/2309-5180-2015-7-1-82-89.
11. Alferyov, V. D. *Metody rascheta svarochnykh deformatsij i napryazhenij sudovykh korpusnykh konstrukcij: monografiya*. SPb.: FGUP «Krylovskij gosudarstvennyj nauchnyj centr», 2014.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Русановский Сергей Александрович —
старший преподаватель
Филиал ФГАУ ВО «Северного (Арктического)
федерального университета имени
М. В. Ломоносова» в г. Северодвинске
164500, Российская Федерация, г. Северодвинск,
ул. Воронина, 6
e-mail: s.rusanovskiy@narfu.ru

Худяков Михаил Павлович —
кандидат технических наук, доцент
Филиал ФГАУ ВО «Северного (Арктического)
федерального университета имени
М. В. Ломоносова» в г. Северодвинске
164500, Российская Федерация, г. Северодвинск,
ул. Воронина, 6
e-mail: m.khudyakov@narfu.ru

Черенков Николай Иванович —
кандидат технических наук, доцент
Филиал ФГАУ ВО «Северного (Арктического)
федерального университета имени
М. В. Ломоносова» в г. Северодвинске
164500, Российская Федерация, г. Северодвинск,
ул. Воронина, 6
e-mail: n.cherenkov@narfu.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Rusanovskiy, Sergey A. —
Senior lecturer
Branch of Northern (Arctic)
Federal University named after M. V. Lomonosov
in Severodvinsk
6 Voronina Str., Severodvinsk, 164500,
Russian Federation
e-mail: s.rusanovskiy@narfu.ru

Khudyakov, Mikhail P. —
PhD, associate professor
Branch of Northern (Arctic)
Federal University named after M. V. Lomonosov
in Severodvinsk
6 Voronina Str., Severodvinsk, 164500,
Russian Federation
e-mail: m.khudyakov@narfu.ru

Cherenkov, Nikolai I. —
PhD, associate professor
Branch of Northern (Arctic)
Federal University named after M. V. Lomonosov
in Severodvinsk
6 Voronina Str., Severodvinsk, 164500,
Russian Federation
e-mail: n.cherenkov@narfu.ru

*Статья поступила в редакцию 17 сентября 2018 г.
Received: September 17, 2018.*

PECULIARITIES OF A CHANGE IN THE SURFACE PROFILE OF ALUMINUM BRONZES IN CAVITATION WEAR IN SEA WATER

Yu. N. Tsvetkov, Ye. O. Gorbachenko

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

Aluminum bronzes BrA9Zh4N4L and BrA7MtZ15Zh3N2Tz2L, used to manufacture ship propellers, were tested on the ultrasonic vibratory apparatus in artificial sea water. Cavitation attack intensity was altered through change in amplitude of horn end oscillation from 15 to 25 μm . It was demonstrated that the arithmetical mean deviation of the assessed profile, corresponding to the end of incubation period of wear, increases compared to the value obtained in fresh water. As the value of the arithmetical mean deviation of the assessed profile, corresponding to the end of the incubation period of wear in fresh water, is constant and does not depend on the intensity of cavitation attack, the analogous value of this parameter, obtained in sea water, increases with the increase in amplitude of horn end oscillation. It is shown that the value of the arithmetical mean deviation of the assessed profile within the incubation period can serve as the indirect estimate of the surface plastic deformation under cavitation attack. Therefore the revealed increase of the arithmetical mean deviation of the assessed profile, corresponding to the end of the incubation period of wear, in transition from fresh water to sea one is a sign of plastisizing action of the latter. This presumption is corroborated by measurements of microhardness of the surface of the bronze BrA7MtZ15Zh3N2Tz2L in wear within the incubation period. Due to the cavitation attack in fresh water the microhardness of the bronze increased by 11 %, whereas in testing in sea water the microhardness of the bronze even decreased by 5 %. However in cavitation wear of ship propellers one probably should not anticipate the same influence of electrochemical factor as it occurs in testing on the ultrasonic vibratory apparatus, because the jets, forming in collapsing the cavitation caverns on propeller blades, have much larger diameter and the intensity of electrochemical corrosion is much lower than it is in testing on the ultrasonic vibratory apparatus. Thus, it seems unnecessary to intensify the corrosion factor by going from fresh to sea water while testing on the vibratory apparatus; otherwise the process of plastic deforming will not be equivalent to one that occurs in cavitation wear of the ship propellers.

Keywords: cavitation wear, sea water, fresh water, aluminum bronzes, ultrasonic vibratory apparatus, incubation period of wear, roughness, plastic deformation, microhardness, cold-working of metal.

For citation:

Tsvetkov, Yuriy N., and Yevgeniy O. Gorbachenko. "Peculiarities of a change in the surface profile of aluminum bronzes in cavitation wear in sea water." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova* 10.5 (2018): 1004–1014. DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-5-1004-1014.

УДК 629.12.037.11.004.62

ОСОБЕННОСТИ ИЗМЕНЕНИЯ ПРОФИЛЯ ПОВЕРХНОСТИ АЛЮМИНИЕВЫХ БРОНЗ ПРИ КАВИТАЦИОННОМ ИЗНАШИВАНИИ В МОРСКОЙ ВОДЕ

Ю. Н. Цветков, Е. О. Горбаченко

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

Проведены испытания алюминиевых бронз BrA9Ж4Н4Л и BrA7Мц15Ж3Н2Ц2Л, применяемых для изготовления судовых движителей, на кавитационное изнашивание на ультразвуковом магнитострикционном вибраторе в искусственной морской воде. Интенсивность кавитационного воздействия варьировали изменением амплитуды колебаний торца концентратора вибратора от 15 до 25 мкм. Показано, что значение высотного параметра шероховатости изнашиваемой поверхности (среднего арифметического отклонения профиля), соответствующего окончанию инкубационного периода, при кавитационном изнашивании в морской воде увеличивается по сравнению с опытами в пресной воде. При этом, если в пресной воде

значение высотного параметра шероховатости, соответствующее окончанию инкубационного периода, не зависит от интенсивности кавитационного воздействия и является величиной постоянной, то в морской воде прослеживается тенденция увеличения этого значения с увеличением амплитуды колебаний торца концентратора. Показано, что значение высотного параметра шероховатости поверхности в пределах инкубационного периода может служить косвенной оценкой степени пластической деформации, поэтому увеличение значения этого параметра, соответствующего окончанию инкубационного периода, при переходе в испытаниях от пресной к морской воде может служить признаком пластифицирующего воздействия морской воды на поверхностный слой бронз при кавитационном изнашивании на ультразвуковом магнитострикционном вибраторе. Высказанное предположение подтверждено также измерениями микротвердости поверхности: при испытаниях в пресной воде среднее упрочнение поверхностных слоев бронзы БрА7Мц15Ж3Н2Ц2Л составило 11 %, тогда как при испытаниях в морской воде микротвердость снизилась примерно на 5 %. Сделано предположение, что при кавитационном изнашивании гребных винтов в морской воде, из-за значительно большего диаметра струй, образующихся при схлопывании кавитационных каверн на лопастях, а также менее интенсивного коррозионного воздействия влияние коррозионного фактора на процесс пластического деформирования поверхностного слоя лопастей пренебрежимо мало по сравнению с условиями испытаний на ультразвуковых магнитострикционных вибраторах. Поэтому при прогнозировании продолжительности инкубационного периода методом измерения профиля поверхности дополнительная интенсификация коррозионного фактора при испытаниях на магнитострикционном вибраторе заменой пресной воды на морскую не требуется. В противном случае процесс пластического деформирования поверхности при кавитационном воздействии не будет соответствовать таковому при кавитационном изнашивании гребных винтов.

Ключевые слова: кавитационное изнашивание, морская вода, пресная вода, алюминиевая бронза, ультразвуковой магнитострикционный вибратор, инкубационный период изнашивания, шероховатость, пластическая деформация, микротвердость, упрочнение металла.

Для цитирования:

Цветков Ю. Н. Особенности изменения профиля поверхности алюминиевых бронз при кавитационном изнашивании в морской воде / Ю. Н. Цветков, Е. О. Горбаченко // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2018. — Т. 10. — № 5. — С. 1004–1014. DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-5-1004-1014.

Введение (Introduction)

Изнашивание при кавитации — распространенное явление в эксплуатации различного гидрооборудования [1]–[4]. На водном транспорте кавитационный износ является частой причиной ремонта гребных винтов и их направляющих насадок [3]–[6]. На гребных винтах морских транспортных судов очаги кавитационного износа возникают на периферии лопастей [3], [6], а у двигателей быстроходных судов, в частности судов на подводных крыльях, — в основном в районе корневых сечений лопастей [6]. Очаги износа имеют губчатую рваную поверхность и в первом случае оказывают влияние на КПД гребных винтов, а во втором, являясь концентратором напряжений, могут привести к обрыву лопасти в эксплуатации, если их вовремя не устранить при ремонте. По этой причине прогнозированию кавитационного изнашивания гребных винтов уделяется серьезное внимание с позиций не только гидромеханики [7], [8], но и материаловедения [3], [9].

При кавитационном воздействии потери материала с изнашиваемой поверхности начинаются по истечении начального (инкубационного) периода. В течение этого периода вначале происходит пластическое деформирование металла до достижения предельной степени деформации, а затем его разупрочнение, характеризуемое развитием микротрещин и их слиянием, в результате чего начинается процесс отделения частиц износа [3], [4], [9]. На практике в большинстве случаев гребные винты при обнаружении очагов износа подвергаются ремонту. Поэтому актуальным является прогнозирование инкубационного периода кавитационного изнашивания и сравнение кавитационной износостойкости материалов сопоставлением продолжительностей инкубационных периодов при их изнашивании.

Для определения продолжительности инкубационного периода необходимо располагать кинетической кривой изнашивания — зависимостью потерь массы металлического материала от продолжительности кавитационного воздействия. Продолжительность инкубационного пери-

ода находят по отрезку, отсекаемому касательной, проведенной в точке максимальной скорости изнашивания, на оси абсцисс [10]. Такие эксперименты отличаются большой продолжительностью и трудоемкостью. Поэтому целесообразной является разработка методик ускоренных испытаний для оценки продолжительности инкубационного периода.

Проведенные эксперименты в пресной воде показали [11], что значение высотного параметра шероховатости, например среднего арифметического отклонения профиля R_a (ГОСТ 25142-82), увеличивается линейно с увеличением продолжительности кавитационного воздействия в пределах инкубационного периода, при этом значение R_a , соответствующее окончанию инкубационного периода, является величиной постоянной, не зависящей от интенсивности кавитационного воздействия при изнашивании одного и того же сплава на конкретной лабораторной установке или в конкретном оборудовании. Выявленные особенности кинетики изменения неровностей поверхности при кавитационном изнашивании позволяют осуществлять прогнозирование продолжительности инкубационного периода с использованием метода измерения профиля поверхности. Однако многие виды оборудования эксплуатируются в коррозионно-активных жидкостях, например, гребные винты и направляющие насадки морских судов, вопрос же, касающийся сохранения указанных закономерностей при изнашивании в условиях существенного влияния коррозии, ранее не исследовался и поэтому является актуальным.

Целью работы является исследование возможности прогнозирования продолжительности инкубационного периода кавитационного изнашивания сплавов, применяемых для изготовления гребных винтов, с использованием метода измерения профиля поверхности при испытании в морской воде.

Методика эксперимента (Experimental Technique)

Кавитационное изнашивание осуществлялось на ультразвуковом магнитоэстрикционном вибраторе (МСВ) [3] при частоте колебаний концентратора, равной примерно 22 кГц. Интенсивность кавитационного воздействия варьировали изменением амплитуды колебаний торца концентратора от 15 до 25 мкм. Амплитуду колебаний измеряли с помощью вихретокового датчика, затем по результатам измерений строили калибровочный график зависимости амплитуды колебаний торца концентратора от выходной мощности ультразвукового излучателя.

Для испытания выбрали две бронзы, широко применяемые для литья гребных винтов: алюминий-никелевую БрА9Ж4Н4Л и марганцево-алюминиевую БрА7Мц15Ж3Н2Ц2Л. Образцы вырезали из лопастей гребных винтов, бывших в эксплуатации. Образцы имели цилиндрическую форму диаметром около 17 мм. Изнашиванию подвергали торцевые поверхности цилиндров, которые предварительно шлифовали на шкурках разной зернистости, а затем полировали на сукне. Расстояние между поверхностью образца и торцом концентратора в опытах выставляли равным 0,5 мм.

В качестве жидкости для экспериментов использовали искусственную морскую воду следующего состава: NaCl — 2,46 % (по массе); KCl — 0,067 %; CaCl₂ · 2H₂O — 0,136 %; MgSO₄ · 7H₂O — 0,629 %; MgCl₂ · 6H₂O — 0,466 %; NaHCO₃ — 0,018 %.

В процессе испытаний МСВ периодически выключали, образцы вынимали из емкости с морской водой, промывали в мягкой пресной воде, высушивали и взвешивали на аналитических весах ВЛР-200, имеющих дискретность показаний 0,05 мг, и по потерям массы определяли износ.

После взвешивания проводили измерения шероховатости на приборе MarSurf PS1. В результате измерений регистрировали значение высотного параметра R_a . Базовую длину (0,8 мм) выбирали таким образом, чтобы полная длина отрезка трассирования (5,6 мм) была меньше диаметра очага износа. Длина оценки (4,0 мм) при этом равнялась пяти базовым длинам. При каждом измерении в пределах очага проводили три отрезка трассирования и на каждом определяли значение R_a .

Результаты экспериментов (Experimental results)

По результатам измерений строили зависимости потерь массы ΔM и параметра шероховатости R_a от продолжительности кавитационного воздействия t (рис. 1). Продолжительность инкуба-

ционного периода определяли по кривой $\Delta M(t)$ как отрезок, отсекаемый на оси абсцисс, касательной к этой кривой, проведенной через точку максимальной скорости изнашивания.

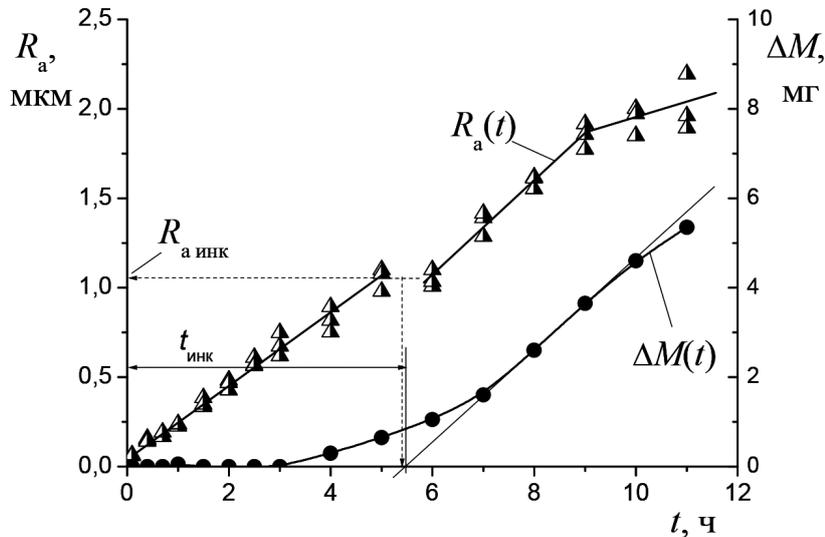


Рис. 1. Изменение шероховатости поверхности и потерь массы образца из бронзы БрА9Ж4Н4Л в зависимости от продолжительности кавитационного воздействия на МСВ в морской воде при амплитуде колебаний торца концентратора 25 мкм

Ранее при испытании в пресной воде отмечалось, что завершение инкубационного периода сопровождается появлением на зависимости $R_a(t)$ характерных особенностей в виде разрывов и / или переломов [11]. Аналогичные особенности в кинетике изменения параметра шероховатости были отмечены и при кавитационном изнашивании в морской воде. Как видно из рис. 1, в момент, соответствующий окончанию инкубационного периода, на зависимости $R_a(t)$ образовался разрыв. Также были отмечены случаи появления не разрыва, а перелома или перегиба.

В процессе обработки полученных зависимостей $R_a(t)$ определяли значения R_a , соответствующие наступлению переломов или разрывов на зависимости $R_a(t)$, т. е. окончанию инкубационного периода — $R_{a.инк}$, и строили зависимости $R_{a.инк}$ от амплитуды колебаний торца концентратора МСВ (рис. 2 и 3).

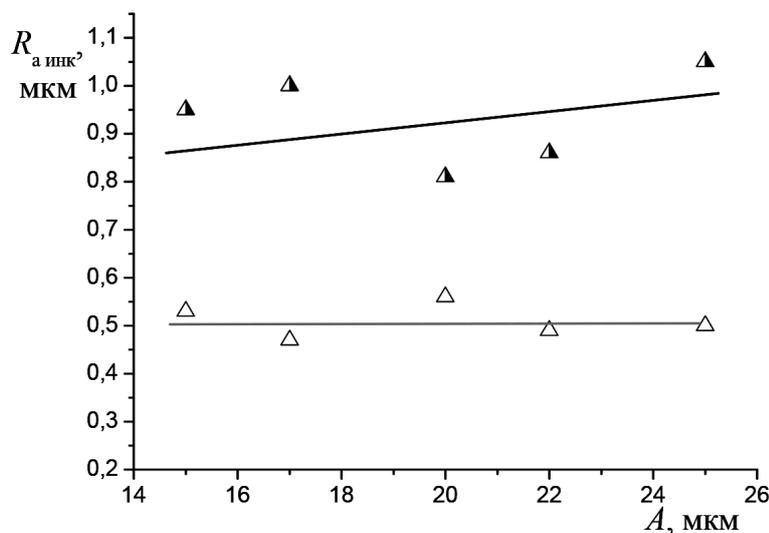


Рис. 2. Изменение параметра R_a шероховатости поверхности, соответствующего окончанию инкубационного периода кавитационного изнашивания, при испытании бронзы БрА9Ж4Н4Л на МСВ в зависимости от амплитуды колебаний торца концентратора
 Условные обозначения: \triangle — пресная вода; \blacktriangle — морская вода

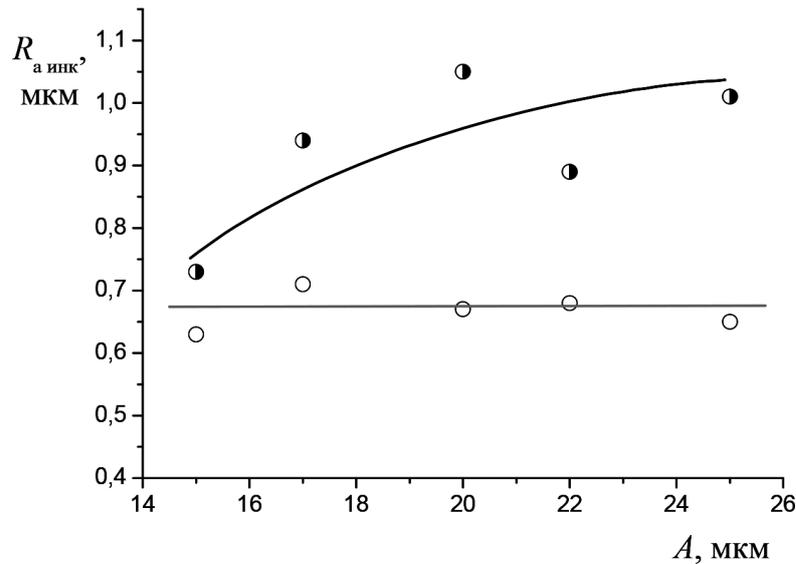


Рис. 3. Изменение параметра R_a шероховатости поверхности, соответствующего окончанию инкубационного периода кавитационного изнашивания, при испытании бронзы БрА7Мц15Ж3Н2Ц2Л на МСВ в зависимости от амплитуды колебаний торца концентратора
Условные обозначения: ○ — пресная вода; ● — морская вода

Анализ результатов экспериментов (Analysis of Experimental Results)

Из сравнения зависимостей, представленных на рис. 2 и 3, можно сделать вывод о двух отличиях между результатами испытаний в пресной и морской воде. Во-первых, если при кавитационном изнашивании в пресной воде значение среднего арифметического отклонения профиля $R_{a,инк}$, соответствующее окончанию инкубационного периода, оказалось постоянным и не зависящим от интенсивности кавитационного воздействия, то в морской воде прослеживается тенденция увеличения этого значения с увеличением амплитуды колебаний торца концентратора; особенно выражено это проявляется для бронзы БрА7Мц15Ж3Н2Ц2Л. Во-вторых, значения $R_{a,инк}$, полученные при испытаниях в морской воде, в среднем в 1,5 раза превышают таковые, полученные при изнашивании в пресной воде.

Тот факт, что при испытаниях в пресной воде значение $R_{a,инк}$ оказалось нечувствительным к амплитуде колебаний торца концентратора, можно объяснить тем, что высота неровностей, появляющихся на поверхности в пределах инкубационного периода, может служить косвенным показателем степени пластической деформации поверхностных слоев. С увеличением высоты неровностей возрастает также длина профиля поверхности. Если в грубом приближении принять, что два компонента главных деформаций: e_r и e_t , лежат в плоскости поверхности, а третий e_z направлен перпендикулярно этой поверхности, то можно оценить порядок пластических деформаций к концу инкубационного периода по следующей формуле:

$$e_i = 2e_r = 2e_t = 2 \ln \frac{L_{инк}}{L_0}, \quad (1)$$

где e_i — интенсивность деформаций поверхностных слоев к концу инкубационного периода; L_0 — длина профиля исходной поверхности, на которую впоследствии оказывается кавитационное воздействие; $L_{инк}$ — длина профиля поверхности к концу инкубационного периода кавитационного изнашивания.

Разрушение поверхности при кавитационном воздействии имеет квазистатический характер [3], т. е. от цикла к циклу происходит накопление пластических деформаций. Изменение интенсивности кавитационного воздействия оказывает влияние лишь на скорость накопления пластических деформаций, при этом значение деформации, соответствующее началу разрушения, должно

оставаться постоянным, а поэтому значение $R_{a.инк}$ как мера указанной критической степени деформации не должно изменяться.

Увеличение высоты неровностей в результате перехода к кавитационному воздействию в морской воде означает увеличение длины профиля поверхности и, согласно выражению (1), увеличение пластической деформации. Т. е. увеличение высоты неровностей, соответствующих концу инкубационного периода, можно объяснить пластифицированием поверхностных слоев при воздействии коррозионной среды. Иными словами, имеет место *хемомеханический эффект* [12] как результат совместного действия в искусственной морской воде механического (кавитационных микроударов) и химического (электрохимической коррозии) факторов.

Поясним причину пластифицирующего влияния морской воды. Кавитационное изнашивание определяется совместным действием коррозионного и механических факторов. Эти два фактора имеют различную природу. Механический фактор зависит от размера кавитационной каверны и, как следствие, от размера объекта, у поверхности которого возникает кавитационная каверна, в то время как коррозионное воздействие на поверхность от размера объекта не зависит. В настоящее время используют в основном две модели, объясняющие механическое воздействие при кавитации. В соответствии с первой моделью на поверхность материала воздействуют ударные волны [13], генерируемые схлопывающимися пузырьками, в соответствии со второй — кумулятивные струйки [14]. Для упрощения анализа примем за основную вторую модель.

Пусть при кавитационном изнашивании в пресной воде, когда можно не учитывать коррозионный фактор, от воздействия кумулятивной струи диаметром d_c при схлопывании каверны в материале образуется зона пластической деформации, достигающая к концу инкубационного периода глубины $d_{пл}$ (рис. 4). Далее предположим, что материал находится в морской воде и на его поверхность оказывается кавитационное воздействие, при этом толщина слоя, удаленного с поверхности под действием коррозии за время, равное инкубационному периоду, составит $d_{кор}$. При одновременном воздействии коррозионного и механического факторов, наряду с повышением плотности дислокаций в поверхностном слое при его пластическом деформировании, в то же время под действием коррозии будет происходить стравливание слоя, насыщенного дислокациями, что создает условия для разрушения ранее сформировавшихся на некоторой глубине плоских скоплений дислокаций и, как следствие, для релаксации микронапряжений и разупрочнения. Ранее изложенное подтверждается измерениями микротвердости бронзы БрА7Мц15ЖЗН2Ц2Л.

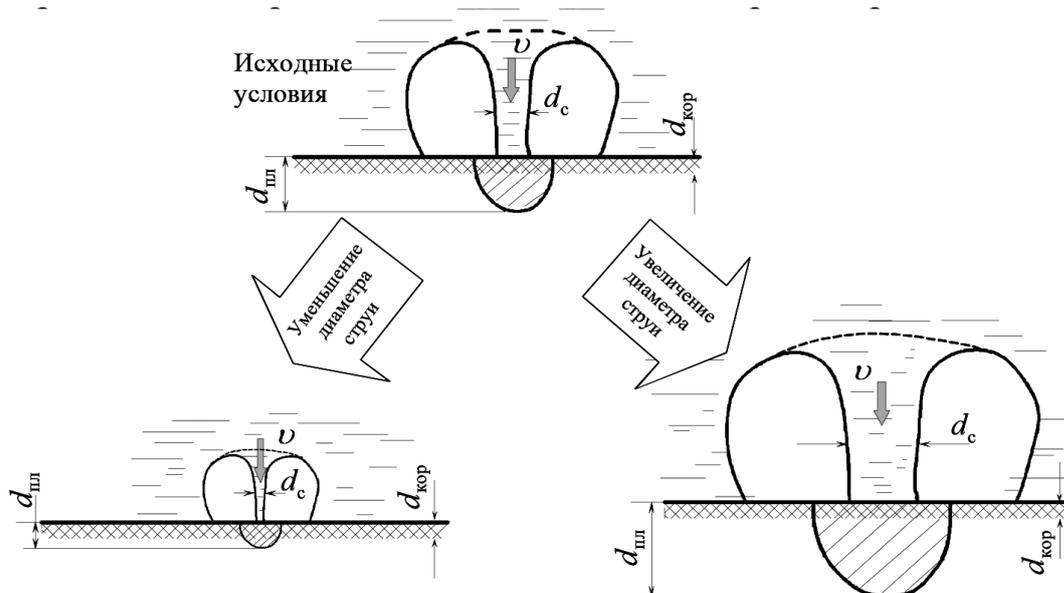


Рис. 4. Влияние диаметра микроструй при схлопывании кавитационных каверн на величину соотношения механического и коррозионного факторов, условно выражаемых через глубину наклепа $d_{пл}$ и толщину слоя $d_{кор}$, удаленного в результате коррозии

На рис. 5 приведена кинетика упрочнения поверхностных слоев бронзы — зависимость микротвердости от продолжительности кавитационного воздействия в течение инкубационного периода. Среднее значение микротвердости в течение инкубационного периода при испытании в морской воде составило 1512 МПа, тогда как исходная микротвердость поверхности составляла 1591 МПа, т. е. микротвердость снизилась на 5 % (произошло даже некоторое разупрочнение). При испытании в пресной воде среднее значение микротвердости в течение инкубационного периода составило 1681 МПа, т. е. по сравнению со значением 1515 МПа, соответствующим исходной поверхности, упрочнение составило 11 %.

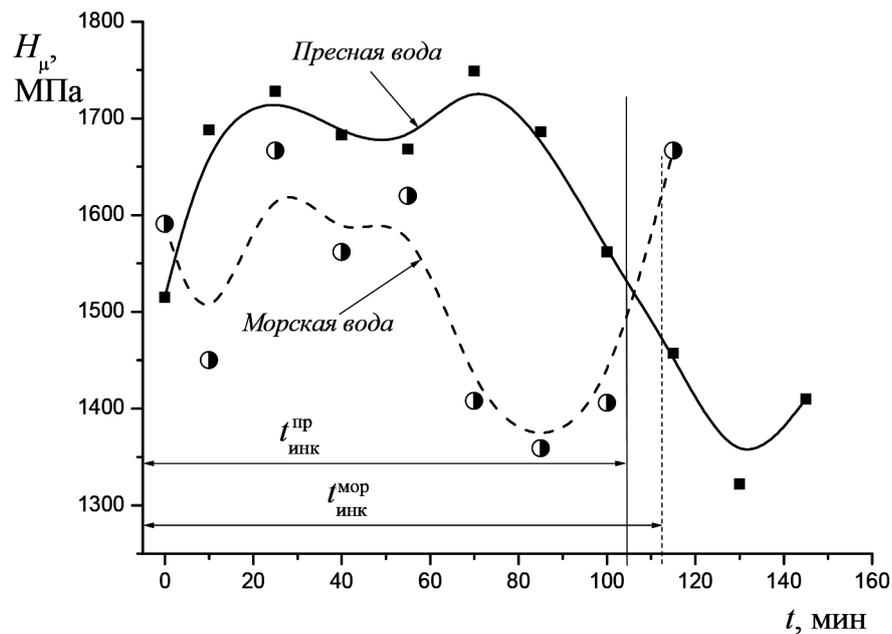


Рис. 5. Кинетика упрочнения бронзы БрА7Мц15ЖЗН2Ц2Л в течение инкубационного периода при изнашивании в пресной и морской воде:

$t_{инк}^{пр}$ и $t_{инк}^{мор}$ — продолжительность инкубационного периода в пресной и морской воде

Стравливание упрочненных слоев приводит к тому, что зона максимальных пластических деформаций формируется на большей глубине, а значит, при испытании в морской воде должна возрасти и продолжительность инкубационного периода по сравнению с испытаниями в пресной. Действительно, значения инкубационного периода, полученные осреднением по всем амплитудам (так как на каждой амплитуде было испытано только по одному образцу), представленные в таблице, для морской воды больше, чем для пресной, как для бронзы БрА7Мц15ЖЗН2Ц2Л, так и для бронзы БрА9Ж4Н4Л.

Продолжительность инкубационного периода, определенная по зависимостям $R_a(t)$, при испытаниях в пресной и морской воде, ч

A, мкм	БрА7Мц15ЖЗН2Ц2Л		БрА9Ж4Н4Л	
	пресная вода	морская вода	пресная вода	морская вода
15	3,1	2,1	6,3	8,45
17	2,0	2,5	5,4	8,45
20	1,2	2,3	2,9	4,6
22	1,2	1,9	2,9	4,45
25	1,9	1,7	4,6	5,45
Среднее	1,88	2,1	4,42	6,28

Известно, что при внедрении в поверхность шарового индентора максимальные касательные напряжения возникают не на поверхности, а на некоторой глубине [15], а значит, первые пласти-

ческие деформации появляются также на некоторой глубине под поверхностью. Если уподобить внедрение струи жидкости при схлопывании кавитационной каверны внедрению в поверхность шарового индентора, то можно предположить, что и для случая кавитационного воздействия максимальные пластические деформации возникают на некоторой глубине под поверхностью, и в этих же местах появляются первые трещины. Это подтверждается исследованием остаточных напряжений в поверхностных слоях при кавитационном воздействии, проведенным с использованием рентгеновского метода [16].

Рассмотрим два случая. 1-й случай — если $d_{пл} \approx d_{кор}$ (см. рис. 4, внизу слева), то в поверхностных слоях не успеет произойти накопление пластических деформаций критической величины, так как наклепанные слои будут стравливаться при электрохимическом действии морской воды. В этом случае, по-видимому, будет реализовываться процесс эрозионной коррозии. 2-й случай — если $d_{пл} \gg d_{кор}$ (см. рис. 4, внизу справа), то влияние коррозии можно не учитывать, так как ее скорость очень мала для того, чтобы достичь зоны максимальных касательных деформаций под поверхностью. При достижении критической степени деформации в этой зоне образуются трещины, которые сливаются, выходят на поверхность и в результате происходит отделение частиц износа вместе с продуктами коррозии поверхностного слоя. Однако в действительности влияние морской воды на механические свойства металлов при ультразвуковой кавитации значительно сложнее. Бронза БрА7Мц15ЖЗН2Ц2Л имеет более низкую коррозионную стойкость в морской воде, чем БрА9Ж4Н4Л.

Эксперименты показали, что при амплитуде 25 мкм коррозионные потери бронзы БрА7Мц15ЖЗН2Ц2Л к концу инкубационного периода составили около 0,29 мм³, что соответствует толщине слоя, равного примерно 2,2 мкм, тогда как коррозионные потери бронзы БрА9Ж4Н4Л в течение инкубационного периода с точностью, обеспечиваемой аналитическими весами, равны нулю (см. рис. 1). Однако влияние морской воды на увеличение продолжительности инкубационного периода изнашивания в случае бронзы БрА9Ж4Н4Л существенно заметнее, чем для бронзы БрА7Мц15ЖЗН2Ц2Л (см. таблицу), хотя, казалось бы, должно быть наоборот. По всей видимости, даже при отсутствии заметных коррозионных потерь материала в морской воде последняя все равно оказывает на поверхностные слои сильное пластифицирующее воздействие. Возможно, это пластифицирующее воздействие усиливается при пропускании в воде ультразвука, так как известно, что область жидкости в окрестности схлопывающихся пузырьков является зоной, в которой интенсифицируются различные химические процессы [17], [18], и в частности такая кавитационная обработка позволяет существенно увеличить концентрацию кислорода.

Действительно, опыты на медных сплавах БрА7Мц15ЖЗН2Ц2Л и ЛЦ40Мц3Ж, коррозионная стойкость которых уступает бронзе БрА9Ж4Н4Л и поэтому их коррозионные потери было легко измерить, показали, что в условиях ультразвукового воздействия в морской воде при амплитуде колебаний торца концентратора МСВ, равной 25 мкм, скорость их коррозии составила примерно 1 мкм/ч. Скорость латуней и алюминиевых бронз в движущейся со скоростью 20 м/с морской воде более чем на порядок ниже и составляет около 0,05–0,1 мкм/ч [19]. Для того чтобы процесс пластического деформирования при изнашивании в лабораторных условиях был адекватен условиям кавитационного изнашивания гребных винтов, необходимо, чтобы выполнялось равенство

$$\left(\frac{d_{кор}}{d_{пл}} \right)_{лаб} = \left(\frac{d_{кор}}{d_{пл}} \right)_{ГВ}, \quad (2)$$

где индексы «лаб» и «ГВ» — условия изнашивания на лабораторной установке и гребных винтов соответственно.

Причем в выражении (2) величину $d_{кор}$ надо понимать не просто как толщину слоя, удаленного при коррозии, а в более широком смысле как толщину слоя, пластифицированного под действием коррозии. Точный механизм этого пластифицирующего действия еще предстоит выяснить. Очень важно знать, является ли это особенностью испытаний на ультразвуковых МСВ или может

проявляться и на лабораторных установках других типов. Таким образом, основываясь на результатах, представленных на рис. 2–5 и в таблице, можно утверждать, что применительно к испытаниям на МСВ равенство (2) не соблюдается, и выполняется условие:

$$\left(\frac{d_{\text{кор}}}{d_{\text{пл}}} \right)_{\text{лаб}} \gg \left(\frac{d_{\text{кор}}}{d_{\text{пл}}} \right)_{\text{ГВ}} .$$

Указанное неравенство обусловлено, во-первых, существенной разницей в порядке величин $d_{\text{пл}}$ — для условий испытаний бронз на МСВ $d_{\text{пл.лаб}} \approx 10$ мкм, тогда как для условий эксплуатации гребных винтов морских судов из бронзы $d_{\text{пл.ГВ}} \approx 10$ мм; и, во-вторых, существенной интенсификацией коррозионного действия морской воды в условиях ультразвуковой кавитации.

Таким образом, можно предположить, что в отличие от МСВ на гребных винтах пластифицирующее влияние морской воды при кавитационном изнашивании не будет оказывать существенного влияния, и этим влиянием можно пренебречь. Поэтому при использовании метода измерения профиля поверхности для прогнозирования продолжительности инкубационного периода дополнительная интенсификация коррозионного фактора при испытаниях на МСВ заменой пресной воды на морскую является, по всей видимости, излишней.

Выводы (Summary)

1. Значение среднего арифметического отклонения профиля R_a , соответствующего окончанию инкубационного периода, при кавитационном изнашивании на ультразвуковом МСВ в морской воде увеличивается по сравнению с опытами в пресной воде. При этом, если в пресной воде значение R_a , соответствующее окончанию инкубационного периода, не зависит от интенсивности кавитационного воздействия и является величиной постоянной, то в морской воде прослеживается тенденция увеличения этого значения с увеличением амплитуды колебаний торца концентратора.

2. Увеличение значения R_a , соответствующего окончанию инкубационного периода, при переходе от испытаний в пресной к испытаниям морской воде может служить признаком пластифицирующего воздействия морской воды на поверхностный слой бронз при кавитационном изнашивании на ультразвуковом МСВ. Причина этого заключается в очень малой толщине поверхностного слоя, подвергающегося пластической деформации, и интенсивном воздействии электрохимической коррозии, усиливаемомся в условиях ультразвуковой кавитации.

3. Можно предположить, что при кавитационном изнашивании гребных винтов, эксплуатирующихся в морской воде, из-за значительно большего диаметра струй, образующихся при схлопывании кавитационных каверн на лопастях, а также менее интенсивного коррозионного воздействия, влияние коррозионного фактора на процесс пластического деформирования поверхностного слоя лопастей пренебрежимо мало по сравнению с условиями испытаний на ультразвуковом МСВ. Поэтому при прогнозировании продолжительности инкубационного периода методом измерения профиля поверхности дополнительная интенсификация коррозионного фактора при испытаниях на МСВ с помощью замены пресной воды на морскую не требуется. В противном случае процесс пластического деформирования поверхности при кавитационном воздействии не будет соответствовать идентичному процессу при кавитационном изнашивании гребных винтов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Sreedhar B. K. Cavitation damage: Theory and measurements – A review / B. K. Sreedhar, S. K. Albert, A. B. Pandit // Wear. — 2017. — Vol. 372–373. — Pp. 177–196. DOI: 10.1016/j.wear.2016.12.009.
2. Петров А. И. Исследование сравнительной стойкости и кавитационной эрозии образцов материалов и покрытий проточной части гидромашин / А. И. Петров, М. М. Скобелев, А. Г. Ханычев // Вестник Московского государственного технического университета им. Н. Э. Баумана. Серия: Машиностроение. — 2015. — № 2 (101). — С. 128–137.

3. Цветков Ю. Н. Кавитационное изнашивание металлов и оборудования / Ю. Н. Цветков. — СПб.: Изд-во СПбГПУ, 2003. — 155 с.
4. Фомин В. В. Гидроэрозия металлов / В. В. Фомин. — М.: Машиностроение, 1977. — 287 с.
5. Быстрицкий В. В. Эрозионный износ направляющих насадок / В. В. Быстрицкий // Труды ЛИВТ. — 1972. — № 135. — С. 26–39.
6. Георгиевская Е. П. Кавитационная эрозия гребных винтов и методы борьбы с ней / Е. П. Георгиевская. — Л.: Судостроение, 1978. — 206 с.
7. Boorsma A. Understanding the Details of Cavitation / A. Boorsma, S. Whitworth // Proceedings of the Second International Symposium on Marine Propulsors (Smp'11). — Hamburg, Germany, 2011. — Pp. 319–327.
8. Ponkratov D. DES Prediction of Cavitation Erosion and Its Validation for a Ship Scale Propeller / D. Ponkratov // Journal of Physics: Conference Series. — IOP Publishing, 2015. — Vol. 656. — Pp. 012055. DOI: 10.1088/1742-6596/656/1/012055.
9. Погодаев Л. И. Гидроабразивный и кавитационный износ судового оборудования / Л. И. Погодаев, П. А. Шевченко. — Л.: Судостроение, 1984. — 264 с.
10. ASTM G32-10 Standard test method for cavitation erosion using vibratory device. — ASTM International, 2010. — 19 p.
11. Горбаченко Е. О. Кинетика изменения профиля поверхности алюминиевых бронз при кавитационном изнашивании / Е. О. Горбаченко, Ю. Н. Цветков // Трение и износ. — 2018. — Т. 39. — № 3. — С. 277–282.
12. Гутман Э. М. Механохимия металлов и защита от коррозии / Э. М. Гутман. — М.: Metallurgia, 1981. — 271 с.
13. Прис К. М. Кавитационная эрозия / К. М. Прис / в кн. Эрозия: пер. с англ. — М.: Мир, 1982. — С. 269–330.
14. Аганин А. А. Схлопывание кавитационного пузырька в жидкости вблизи твердой стенки / А. А. Аганин [и др.]. — Вестник Башкирского университета. — 2013. — Т. 18. — № 1. — С. 15–21.
15. Пинегин С. В. Контактная прочность и сопротивление качению / С. В. Пинегин. — М.: Машиностроение, 1969. — 243 с.
16. Terauchi Y. Correlation of cavitation damage tests with residual stress measurements / Y. Terauchi, H. Matsuura, M. Kitamura // Bulletin of the JSME. — 1973. — Vol. 16. — No. 102. — Pp. 1829–1838. DOI: 10.1299/jsmel958.16.1829.
17. Маргулис М. А. Звукохимические реакции и сонолюминесценция / В. А. Маргулис. — М.: Химия, 1986. — 288 с.
18. Эльпинер И. Е. О механизме химического действия ультразвуковых волн (обзор) / И. Е. Эльпинер // Акустический журнал. — 1959. — Т. V. — № 2. — С. 133–145.
19. Богорад И. Я. Коррозия и защита морских судов / И. Я. Богорад [и др.]. — Л.: Судостроение, 1973. — 392 с.

REFERENCES

1. Sreedhar, B. K., S. K. Albert, and A. B. Pandit. “Cavitation damage: Theory and measurements – A review.” *Wear* 372–373 (2017): 177–196. DOI: 10.1016/j.wear.2016.12.009
2. Petrov, A. I., M. M. Skobelev, and A. G. Khanychev. “Study of comparative resistance to cavitation erosion of material samples and coatings in the hydraulic machine flow sections.” *Herald of the Bauman Moscow State Technical University. Series Mechanical Engineering* 2(101) (2015): 128–137.
3. Tsvetkov, Yu. N. *Kavitatsionnoe iznashivanie metallov i oborudovaniya*. SPb.: Izd-vo SPbGPU, 2003.
4. Fomin, V. V. *Gidroeroziya metallov*. M.: Mashinostroenie, 1977.
5. Bystritskii, V. V. “Eroziionnyi iznos napravlyayushchikh nasadok.” *Trudy LIVT* 135 (1972): 26–39.
6. Georgievskaya, E. P. *Kavitatsionnaya eroziya grebnykh vintov i metody bor'by s nei*. L.: Sudostroenie, 1978.
7. Boorsma, Anne, and Stewart Whitworth. “Understanding the details of cavitation.” *Second International Symposium on Marine Propulsors*. Hamburg, Germany, 2011. 319–327.
8. Ponkratov, Dmitriy. “DES Prediction of Cavitation Erosion and Its Validation for a Ship Scale Propeller.” *Journal of Physics: Conference Series*. Vol. 656. IOP Publishing, 2015. DOI: 10.1088/1742-6596/656/1/012055.
9. Pogodaev, L. I., and P. A. Shevchenko. *Gidroabrazivnyi i kavitatsionnyi iznos sudovogo oborudovaniya*. L.: Sudostroenie, 1984.

10. ASTM G32-10 Standard test method for cavitation erosion using vibratory device. ASTM International, 2010.
11. Gorbachenko, E. O., and Yu. N. Tsvetkov. "Kinetics of Change in Surface Profile of Aluminum Bronzes in Cavitation Wear." *Journal of Friction and Wear* 39.3 (2018): 277–282.
12. Gutman, E. M. *Mekhanokhimiya metalllov i zashchita ot korrozii*. M.: Metallurgiya, 1981.
13. Pris, K. M. "Kavitatsionnaya eroziya." *Eroziya*. Translate from Eng. M.: Mir, 1982. 269–330.
14. Aganin, A. A., M. A. Ilgamov, L. A. Kosolapova, and V. G. Malakhov. "Collapse of A cavitation bubble in fluid near RIGID wall." *Bulletin of Bashkir University* 18.1 (2013): 15–21.
15. Pinegin, S. V. *Kontaktная prochnost' i soprotivlenie kacheniyu*. M.: Mashinostroenie, 1969.
16. Terauchi, Yoshio, Hiroshi Matuura, and Minoru Kitamura. "Correlation of cavitation damage tests with residual stress measurements." *Bulletin of JSME* 16.102 (1973): 1829–1839. DOI: 10.1299/jsme1958.16.1829
17. Margulis, M. A. *Zvukokhimicheskie reaktsii i sonolyuminestsentsiya*. M.: Khimiya, 1986.
18. El'piner, I. E. "O mekhanizme khimicheskogo deistviya ul'trazvukovykh voln (obzor)." *Akusticheskii zhurnal* V.2 (1959): 133–145.
19. Bogorad, I. Ya., E. V. Iskra, V. A. Klimova, and Yu. L. Kuz'min. *Korroziya i zashchita morskikh sudov*. L: Sudostroenie, 1973.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Цветков Юрий Николаевич —
доктор технических наук, профессор
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала
С. О. Макарова»
198035, Российская Федерация, Санкт-Петербург,
ул. Двинская, 5/7.
e-mail: yuritsvet@mail.ru, ZvetkovUN@gumrf.ru
Горбаченко Евгений Олегович — аспирант
Научный руководитель:
Цветков Юрий Николаевич
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала
С. О. Макарова»
198035, Российская Федерация, Санкт-Петербург,
ул. Двинская, 5/7.
e-mail: jenyraqwerty@gmail.com

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Tsvetkov, Yuriy N. —
Doctor of Technical Sciences, professor
Admiral Makarov State University of Maritime
and Inland Shipping
5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg, 198035,
Russian Federation
e-mail: yuritsvet@mail.ru, ZvetkovUN@gumrf.ru
Gorbachenko, Yevgeniy O. — Postgraduate
Supervisor:
Tsvetkov, Yuriy N.
Admiral Makarov State University of Maritime
and Inland Shipping
5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg, 198035,
Russian Federation
e-mail: jenyraqwerty@gmail.com

*Статья поступила в редакцию 17 сентября 2018 г.
Received: September 17, 2018.*

СУДОВЫЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ УСТАНОВКИ, СИСТЕМЫ И УСТРОЙСТВА

DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-5-1015-1024

THE CATALYTIC NEUTRALIZATION OF EXHAUST GASES IN SHIP POWER PLANTS

V. Ye. Leonov¹, A. D. Serdyuk²

¹ — Kherson State Maritime Academy, Kherson, Ukraine

² — Kherson sea port, Kherson, Ukraine

Since 1 January 2020 all world transport, according to the decision of the International Maritime Organization, transfers to the low-sulfur fuel (no more than 0.5% of mass S-compounds in marine fuel). From such a transition, the decision of the International Maritime Organization exempts ships which are equipped with systems for the purification of exhaust gases of ship power plants from sulfur compounds, as well as those vessels that conduct research on the development of effective methods of purification from sulfur compounds. In this article, a catalytic method for the purification of exhaust gases from ship power plants is suggested.

It should be noted, that the transition to low-sulfur fuel can only reduce emissions of sulfur and / or sulfuric anhydride, while reducing the damage to the air basin, and the cost of low-sulfur fuel is 2-5 times higher than the cost of conventional marine fuel, in which the content of sulfur compounds does not exceed 3,5% mass.

For the neutralization of exhaust gases of car engines, the catalysts which contain precious metals and their compounds – platinum, palladium, rhodium, ruthenium, rare earth elements are used. The aim of this work is to create the catalysts for neutralization of toxic substances which are contained in exhaust gases of ship power plants that do not contain precious metals and their compounds, but the catalytic activity and duration of action is not inferior to catalysts, which are based on use of precious metals. To reduce the amount of work on the selection of effective and stable catalysts, it is suggested to use only carbon monoxide instead of studying a wide nomenclature of harmful toxic substances contained in the exhaust gases of ship power plants. A new technology for the preparation of catalysts for the neutralization of exhaust gases of power plants has been developed in our study. This technology is based on the use of a cheap raw materials source with a large stock ratio, as well as secondary material resources and technological systems wastes. For the real vessel OXL “Samurai” in the engine room technological calculations were performed to optimally locate the catalytic neutralization installation for the purification of toxic gases of ship power plant and heat exchange equipment for the heat utilization of exhaust gases. The technology fully meets the requirements of resource-saving and environmental protection. The management of the integrated technology is based on automation of the process using modern software.

Keywords: non-precious metals, exhaust gases neutralization, ship power plant, carbon monoxide, heat utilization, new purification installation, exhaust gases, catalytic cleaning, International Maritime Organization, toxic substances.

For citation:

Leonov, Valeriy Ye., and Alexander D. Serdyuk. “The catalytic neutralization of exhaust gases in ship power plants.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 10.5 (2018): 1015–1024. DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-5-1015-1024.

УДК 504.3.054

КАТАЛИТИЧЕСКАЯ ОЧИСТКА ОТРАБОТАННЫХ ГАЗОВ В СУДОВЫХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВКАХ

В. Е. Леонов¹, А. Д. Сердюк²

¹ — Херсонская государственная морская академия, Херсон, Украина

² — Херсонский морской торговый порт, Украина, Херсон

С 1 января 2020 г. весь мировой транспорт, согласно решению Международной морской организации, переходит на низкосернистое топливо (не более 0,5% масс. S-соединений в судовом топливе). От такого перехода, по решению Международной морской организации, освобождаются суда, укомплектованные системами очистки отработанных газов судовых энергетических установок от сернистых соединений, а также научно-исследовательские суда, занимающиеся разработкой систем очистки отработанных газов судовых энергетических установок от сернистых соединений. В настоящей статье предлагается каталитический способ очистки отработанных газов судовых энергетических установок. Отмечается, что переход на низкосернистое топливо позволяет снизить только эмиссию сернистого и / или серного ангидрида, при этом снижается ущерб воздушного бассейна, а стоимость низкосернистого топлива в 2–5 раз выше стоимости обычного судового топлива, в котором содержание серосоединений не превышает 3,5 % масс. Для нейтрализации отработанных газов двигателей транспортных средств используют катализаторы, содержащие драгоценные металлы и их соединения: платину, палладий, родий, рутений, а также редкоземельные элементы.

Целью данной работы является создание катализаторов нейтрализации токсических веществ и соединений, не содержащих драгоценных металлов и их соединений, а по каталитической активности и длительности действия, не уступающих катализаторам на основе драгоценных металлов. Для снижения объема работ по подбору эффективных и стабильных катализаторов предложено вместо исследований широкой номенклатуры вредных токсических веществ, содержащихся в отработанных газах судовых энергетических установок, использовать только монооксид углерода. Разработана новая технология приготовления катализаторов нейтрализации отработанных газов энергосиловых установок. Технология основана на использовании исходного дешевого сырья с большой кратностью запаса, а также вторичных материальных ресурсов и отходов техногенных систем. Для реального судна OXL «Samurai» в машино-котельном отделении были выполнены технологические расчеты по оптимальному размещению каталитической установки нейтрализации отработанных газов судовой энергетической установки и теплообменного оборудования для утилизации теплоты отработанных газов. Технология полностью отвечает требованиям ресурсосбережения и защиты окружающей среды. Управление комплексной технологией основано на автоматизации процесса с использованием современного программного обеспечения.

Ключевые слова: недорогие металлы, очистка отработанных газов, судовая энергетическая установка, монооксид углерода, утилизация теплоты, новая система очистки, отработанные газы, каталитическая очистка, Международная морская организация, токсические вещества.

Для цитирования:

Леонов В. Е. Каталитическая очистка отработанных газов в судовых энергетических установках / В. Е. Леонов, А. Д. Сердюк // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2018. — Т. 10. — № 5. — С. 1015–1024. DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-5-1015-1024.

Introduction

Nowadays, the role of Industrial Ecology which specializes in the degree of harm assessment caused by the industrialization and the intensive growth in mankind's requirements is considerably increasing. Undoubtedly, transport is known as the main factor of air pollution [1]-[2]. In Cosmopolitan cities the contribution of air pollution caused by transport reaches 85-90%. Over the past 50 years the World Merchant Fleet has been increased more than in 25 times. Moreover, the role of maritime, railway and air transport has been highly intensified. Although the impact of air and maritime transport on the environmental pollution and the increase in "greenhouse effect" is considerably high (currently it is more than 10%) and has a growing tendency, marine and air transport industries have not been included into Outcomes of 2015 United Nations Climate Change Conference, Le Bourget in the suburbs of Paris, France.

The exhaust gases of ship power plants (further the EG SPP) are consisted of more than 200 harmful toxic components which are carcinogenic, mutagenic, irritating and poisonous by their nature, relate to the I-IV classes of dangerous impact on human health. Furthermore, besides chemical pollution, the EG SPP possess high enthalpy that leads to the thermal pollution of air basin. According to the all mentioned factors, from the Ecology safety and Environmental Protection perspective the concern of the safe EG SPP neutralization and purification remains relevant and highly-significant [3].

In order to reduce the "pressure" of man-made systems on the environment and the biosphere, recently engineering and technical means of environmental protection are being developed and improved.

The scientific basis for the creation of closed, low-waste, resource-saving and waste-free technological processes are evolving.

In the research [4] the requirements of the International Normative Legal Acts to the permissible level of toxicity of exhaust gases of car engines (the EG CE) and the EG SPP are analyzed and generalized. As a result, it is established that the requirements to the level of toxicity of the EG CE are much ‘striker’ in comparison with the requirements to the level of toxicity of the EG SPP. However, these differences in the requirements for the level of toxicity of the EG CE and the EG SPP are particularly paradoxical against the fact, that the macro-composition, the physiological effects on humans and the biosphere, as well as their impact on the quality of the environment are resulted equally both by the EG SPP and the EG CE. These emissions, regardless of their origin, are almost congruent and in both cases are very dangerous.

In the research [5] to reduce the emission of ‘greenhouse’ gas components from ships, operating in seaport areas and populated areas adjacent to the ports, up to 2030, three scenarios for environmental protection are suggested, namely:

1. Development and application of alternative marine fuels.
2. Development of new designs of ships and ship power plants.
3. Analysis and development of new technical solutions, and as a result, their implementation.

In order to reduce the EG SPP content of harmful components to the maximum permissible standards, particularly to EURO-VI requirements [6], the following methods of the EG SPP purification are used:

1. Physical:
 - low temperature condensation;
 - membrane separation.
2. Physicochemical:
 - absorption;
 - adsorption;
 - high temperature – thermal oxidation, pyrolysis;
 - chemical – conversion, destruction;
 - catalytic.
3. Biological:
 - biochemical oxidation by microorganisms, anaerobic decomposition.
4. Combined.

This research work includes:

- the development of a simple, unified method of catalytic activity of catalysts determination;
- the study of catalytic activity of oxidation catalysts;
- the development of the catalyst preparation technology for the EG SPP neutralization without expensive precious metals or their compounds in its structure.

Catalytic reactions can be divided into three classes:

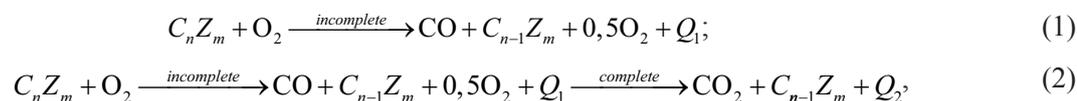
1. Catalytic oxidation.
2. Catalytic reduction.
3. Catalytic conjugated chemical reactions.

In this research work the cluster of catalytic oxidation of the harmful, toxic compounds which contain in the EG SPP is investigated.

The catalytic oxidation reaction can be divided into two subclasses:

1. Incomplete catalytic oxidation.
2. Complete catalytic oxidation.

For instance, any carbon-containing organic compounds may be subjected to catalytic oxidation according to two routes (subclasses) according to the following equations:



where Z_m — can include hydrogen, oxygen, nitrogen, sulphur, chlorine, etc.

On the one hand, the second subclass – complete catalytic oxidation – equation (2) is more profitable from the perspective of energy, sanitary and environmental constituent parts. Moreover, the heat generated while the complete catalytic oxidation is more (Q_1+Q_2) than the heat generated while the incomplete catalytic oxidation (Q_1) by the amount of Q_2 heat. On the other hand, carbon monoxide is a toxic compound while carbon dioxide is a neutral compound.

Due to the wide range of harmful toxic substances contained in the EG SPP studying the catalytic activity of catalysis for each of them individually is definitely a very time-consuming and costly procedure.

Methods and materials

Based on the theoretical assumptions and practical results, the carbon monoxide is suggested by us as the main organic, carbonaceous substance for the catalytic activity of oxidation catalysts study. Moreover, carbon monoxide has the only one route of catalytic oxidation – complete catalytic oxidation subclass – with only carbon dioxide formation.

The experiments were conducted on the two oxide catalysts: C_1 and C_2 in Boreskov Institute of Catalysis as part of Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, fraction 1×1 mm (table 1). The study of the activity of the catalyst was carried out in running unit (reactor of ideal displacement) with a fixed catalyst.

The temperature was controlled by thermocouple. The temperature measurement was ranging between 20-450 °C. The carbon monoxide content analysis was carried out by using the detector of the gas chromatograph at the inlet in the reactor apparatus and at the output from it. The CO concentration measurements were taken at least three times. The average value was considered as the measurement result.

Table 1

C_1 and C_2 catalyst characteristics

The catalyst	Chemical composition, mass %	Specific surface area, m ² /g
C_1 in the granule form	CuO – 10 Cr ₂ O ₃ – 10 γ -Al ₂ O ₃ – 80	170
C_2 in the granule form	Co ₂ O ₃ – 11 Cr ₂ O ₃ – 6 Cr(+VI) no more than 0,05 SiO ₂ – 82,95	110

Laboratory installation has a block-modular design and consists of five main parts:

1. The carbon monoxide receiving system.
2. The preparation and batching of initial reaction mixture system (a mixture of carbon monoxide and air).
3. The reactor unit.
4. The cooling gas system.
5. The system of condensation and separation – liquid phase – water and gaseous mixture – carbon monoxide, carbon dioxide, nitrogen and oxygen.

The carbon monoxide used in the experiment was received as a result of formic acid decomposition in the presence of a catalyst – Sulphur acid, at a temperature of 75-100 °C according to the following reaction:



where l , v , and g are liquid, vapor and gas phases respectively.

Results

Study of the catalyst activity in the carbon monoxide oxidation was carried out under the following circumstances:

- the catalyst grain was 1×1 mm;
- volumetric flow of the reaction mixture was 9 and 11 cm³/s;
- the carbon monoxide content in the air was 123 mg/m³;
- the excessive pressure in the reactor was 1000 mm Hg.

To study the catalytic activity, the catalyst sample was heated in a stream of air to a predetermined temperature beforehand, and then instead of air in the reaction mixture (a mixture of carbon monoxide and air) it was dosed out.

In the testing process we determined the degree of conversion of carbon monoxide (X, %) and the chemical reaction rate constant (K, mm³/s×mg).

The catalytic activity of the carbon monoxide oxidation on the catalyst C₁ was studied at the gas mixture flow of 9 and 11 cm³/s, at the temperature range 160–260 °C with the initial carbon monoxide concentration of 123 mg/m³.

The mass of catalyst which was loaded in the reactor was 90 mg, size of investigated catalyst fractions was 1×1 mm.

The degree of carbon monoxide conversion was changed from 17% to 72%. The results are shown in a table 2 and table 3.

Table 2

Results of research at the 9 cm³/s gas mixture flow on the C₁ catalyst

№ пп.	T, °C	C _{CO} (input), mg/m ³	C _{CO} (output), mg/m ³	X _{CO} , %	K*, mm ³ /s×g	LnK
1	160	123	98	18	25,25	3,23
2	160	123	100	17	23,12	3,14
3	210	123	68	43	71,39	4,27
4	260	123	43	64	129,14	4,86

Table 3

Results of research at the 11 cm³/s gas mixture flow on the C₁ catalyst

№ пп.	T, °C	C _{CO} (input), mg/m ³	C _{CO} (output), mg/m ³	X _{CO} , %	K*, mm ³ /s×g	LnK
1	160	123	89	28	33,76	3,56
2	160	123	90	26	31,78	3,46
3	210	123	60	51	74,83	4,32
4	260	123	34	72	132,88	4,89

The catalytic activity of the carbon monoxide oxidation on the catalyst C₂ was studied at the gas mixture flow of 9 and 11 cm³/s, at the temperature range 150–250 °C with the initial carbon monoxide concentration of 123 mg/m³. The loaded in the reactor catalyst mass was 1700 mg, size of investigated catalyst fractions was 1×1 mm.

The degree of carbon monoxide conversion was changed from 28% to 82%. The results are shown in table 4 and 5.

Table 4

Results of research at the 9 cm³/s gas mixture flow on the C₂ catalyst

№ пп.	T, °C	C _{CO} (input), mg/m ³	C _{CO} (output), mg/m ³	X _{CO} , %	K*, mm ³ /s×g	LnK
1	150	123	89,00	27,78	2,18	0,78
2	150	123	87,29	29,17	2,31	0,84
3	200	123	42,79	65,28	7,10	1,96
4	250	123	27,39	77,78	10,10	2,31

Results of research at the 11 cm³/s gas mixture flow on the C₂ catalyst

№ пп.	T, °C	C _{co} (input), mg/m ³	C _{CO} (output), mg/m ³	X _{CO} , %	K*, mm ³ /s×g	LnK
1	150	123	73,60	40,28	2,83	1,04
2	150	123	73,60	40,28	2,83	1,04
3	200	123	34,23	72,22	7,03	1,95
4	250	123	22,25	81,94	9,40	2,24

According to the study of the carbon monoxide oxidation on the C₁ and C₂ catalysts following points should be mentioned:

1. The oxidation of carbon monoxide on the C₁ and C₂ catalyst has a clear dependence. The temperature growth increases the CO degree of conversion; the rate constant of chemical oxidation in the reactor increases as well.

2. The C₁ catalyst is the most active one, because at equal temperatures the rate constant of a chemical reaction in the presence of C₁ catalyst was more, than on the C₂ catalyst.

3. The work on the C₁ catalyst allows to save catalyst mass which is loaded in the reactor, meanwhile operations under the same conditions on the C₂ catalyst require the 19 times more catalyst mass loaded in than the used on the C₁ catalyst.

Thus, based on the performed studies, the catalyst C₁ is recommended by us for catalytic purification of the EG SPP from all toxic components.

Discussion

Based on the conducted research, it can be assumed that the suggested method allows taking measurements of the catalytic activity of different catalysts which are used in the heterogeneous catalytic oxidation of carbonaceous compound processes with acceptable accuracy. The error in the catalytic activity of the catalysts determination does not exceed more than 5% relative.

Therefore, studies on the catalytic activity of carbonaceous compound "C_nZ_m" oxidation catalysts, for instance, the study of carbon monoxide oxidation, allow us to determine the most effective oxidation catalyst fast and cost-effectively.

The activity of the catalyst should be determined for specifically selected carbonaceous, toxic substances with the aim of increasing the reliability of the selected catalyst, namely:

At the point of the optimal temperature which is obtained as a result of the carbon monoxide oxidation on the selected catalyst.

At the point of the real oxygen concentration in the EG SPP. It is advisable to specify the technological parameters which are obtained during the carbon monoxide oxidation on the selected catalyst.

In the developed European Union countries for exhaust gases neutralization and purification from toxic compounds which are produced by power plants and, particularly by cars, the expensive catalysts based on platinum, rhodium, rare earth elements and its compounds are used [4].

The purpose of the exhaust gases neutralization and purification from toxic compounds which are produced by power plants is to be in compliance with the health standards which are established by EURO-VI requirements to limit the level of toxicity of exhaust gases.

In the research [7] the catalysts for the carbon monoxide oxidation to carbon dioxide which contain expensive precious metals such as platinum, europium, cerium, titanium were obtained by the extraction-pyrolytic method. The active CO to CO₂ oxidation catalysts were obtained, particularly such catalytic systems as Pt + CeO_x + Eu₂O₃/γ - Al₂O₃, Eu₂O₃/SiO₂, Pt/SiO₂ and Pt/TiO₂/Ti. The Pt/TiO₂/Ti system was obtained by combination of plasma-electrolytic oxidation and extraction-pyrolytic methods.

In the research [8] the catalysts which are based on expensive materials such as Pd, Pt, Rh, La, Ce/γ - Al₂O₃ in the three-way neutralization reaction: (1) carbon monoxide – (2) hydrocarbons – (3) nitrogen oxides were analyzed. It must be noted, that simultaneous neutralization of all three compounds is not possible, because the carbon monoxide and hydrocarbons are neutralized by the catalytic oxidation

reactions, whereas nitrogen oxides are neutralized by the catalytic reduction reactions. As far as we are concerned, various catalysts which are separated in time and space, placed in different reactor apparatus should be implemented for these neutralization processes.

In the research [9] the issue which relates to the hydrogen usage, namely its production, storage and transportation was analysed. The most common and widely-spread technologies of hydrogen production are considered, such as the hydrogen production in the process of a steam catalytic conversion and water electrolysis which require the usage of expensive catalysts based on platinum.

In the research [10] the technology of the precious metals extraction (the platinum, palladium, rhodium extraction) from the spent catalysts of EG SPP neutralization is suggested by means of manifold smelting in plasma-arc furnace with the use of self-generated steel manifold.

We have conducted a scientific-research work which was directed on expensive, precious, and scarce metals replacement in production of exhaust gases neutralization catalysts.

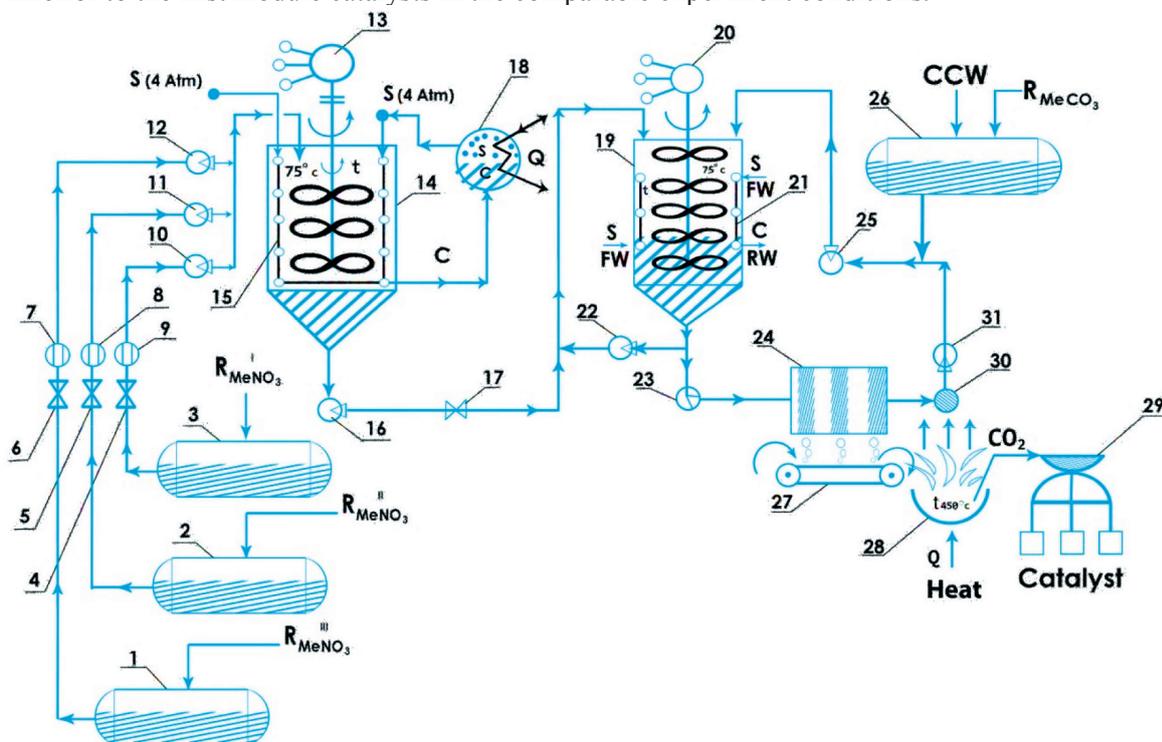
We have conditionally divided the technology of catalysts preparation into three modules according to the principle of the feedstock usage, namely:

1. The present technologies with the use of precious metals.
2. The classical technologies without the use of precious metals.
3. New integrated technologies without the use of precious metals.

The catalyst samples were prepared according to three modules and were tested on the flow type installation of ideal displacement in comparable conditions through the above mentioned method. Carbon monoxide was used as the initial toxic substance.

The most active catalysts were selected from the second and the third modules and were further compared with the first module catalysts.

As a result, the most active catalysts of the second and the third modules were identified which are not inferior to the first module catalysts in the comparable experiment conditions.



Specification of appliance: 1–3, 26 — catchment tanks; 4–6, 17 — shut-off and control valves; 7–12, 16, 22, 25, 31 — pumps; 13, 20 — an electric engine of three-phase alternating current; 14 — a mixer; 15, 21 — a steam and condensate manifold; 18 — a heat exchanger; 19 — reactor apparatus; 23 — a slurry pump; 24 — a frame filter; 27 — a conveyor belt; 28 — a calcining furnace; 29 — a tableting machine; 30 — a stabilizer; S — steam; Q — energy; C — condensate vapours of steam; CCW — chemically cleaned water; R — material flows; RW — returned water / wastewater; FW — fresh water; t — temperature

Fig. 1. The unit of catalysts preparation

The resource-conserving technology of catalyst preparation based on cheap materials, without expensive precious metals in their structure has been developed by us based on the third module catalyst formula. The scheme of this technology is shown on the figure 1.

The developed by us technology includes the following stages:

1. The preparation of reaction systems (positions 1–15).
2. The conversion of the reaction systems in the reactor apparatus – device mixer (positions 19–22, 25, 26).
3. The reactions precipitate dehydration, followed by drying and calcining (positions 24, 27, 28).
4. The tableting and / or granulation of the catalyst (position 29).

In the research [4] the complex technology of the warmth utilization from the EG SPP was suggested with the further exhaust gases treatment / neutralization from toxic compounds. The layout for the apparatus and the pipe manifold assembly installation which will utilize the excess heat and purify / neutralize the EG SPP in the engine department of the real ship OXL “Samurai” has been developed [11].

The financial support for the creation of an integrated installation is not significant. Moreover, the payback period of financial cost will take three years. The catalytic reactor apparatus of the toxic compounds oxidation which are contained in the EG SPP with the tube assemblies requires less space and the payback period of financial cost will take less than three years. Meanwhile, the passport-mode of ship power plant operation is not contravened in normal exploitation conditions and during forced modes of manoeuvring the vessel.

Conclusion

The simple method of testing catalysts on the catalytic activity in the heterogeneous catalytic oxidation reactions of one-carbon compounds is suggested.

The correlation between the catalytic carbon monoxide oxidation and organic one-carbon compounds in catalytic oxidation reactions is established.

The analysis and generalization of scientific and technical publications in the field of the catalysts of the EG SPP neutralization, particularly the analysis of catalytic systems which contain expensive, precious metals in their structure are held.

The tests of the catalysts of the EG SPP neutralization which contain expensive, precious metals in their structure and which excludes expensive, precious metals in their structure under comparable experimental conditions are conducted. It is determined that catalytic activity of catalysts is almost comparable within the inaccuracy of experiments.

The resource-conserving technology of catalyst preparation based on cheap materials, without expensive precious metals in their structure has been suggested.

The layout for the apparatus and the pipe manifold assembly installation which will utilize the excess heat and purify / neutralize the EG SPP in the engine room of the real ship OXL “Samurai” has been developed.

The financial support for the creation of an integrated installation is not insignificant. Moreover, the payback period of financial cost will take three years.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. MARPOL: articles, protocols, annexes, unified interpretations of the International Convention for the Prevention of Pollution from Ships, 1973, as modified by the Protocol of 1978 relating thereto. — Consolidated edition. — London: International Maritime Organization (IMO), 2017. — 480 p.

2. International Safety Management (ISM) Code with guidelines for its implementation. — London: International Maritime Organization (IMO), 2018. — 96 p.

3. *Леонов В. Е.* Пути повышения энергетической эффективности и экологической безопасности морских грузоперевозок / В. Е. Леонов, М. В. Чепок, Р. А. Дробитко // XI Международная конференция «Стратегия качества в промышленности и образовании». — Болгария, Варна: Technical University, 2015. — Vol. 2. — Pp. 87–93.

4. *Леонов В. Е.* Исследование и разработка технических решений по защите воздушного бассейна при эксплуатации судов / В. Е. Леонов // *Wschodnioeuropejskie Czasopismo Naukowe (East European Scientific Journal)*. — 2017. — № 12 (28). — С. 30–38.

5. *Winnes H.* Reducing GHG emissions from ships in port areas / H. Winnes, L. Styhre, E. Fridell // *Research in Transportation Business & Management*. — 2015. — Vol. 17. — Pp. 73–82. DOI: 10.1016/j.rtbm.2015.10.008
6. A technical summary of Euro 6/VI vehicle emission standards [Электронный ресурс]. — Режим доступа: https://www.theicct.org/sites/default/files/publications/ICCT_Euro6-VI_briefing_jun2016.pdf (дата обращения: 10.06.2018).
7. *Зорин А. В.* Некоторые виды каталитических нейтрализаторов, получаемых экстракционнопиrolитическим методом / А. В. Зорин, И. В. Лукиянчук, М. А. Медков, В. В. Пермяков, В. С. Руднев, Н. И. Стеблевская // *Территория новых возможностей. Вестник Владивостокского государственного университета экономики и сервиса*. — 2010. — № 4. — С. 191–196.
8. *Вольнов А. С.* Новые подходы к очистке отработавших газов двигателей внутреннего сгорания / А.С. Вольнов, Л.Н. Третьяк, Е.М. Герасимов // *Вестник Оренбургского государственного университета*. — 2014. — № 10 (171). — С. 36–43.
9. *Verbruggen S. W.* Inside Back Cover: Harvesting Hydrogen Gas from Air Pollutants with an Unbiased Gas Phase Photoelectrochemical Cell / S.W. Verbruggen, M. Van Hal, T. Bosserez, J. Rongé, B. Hauchecorne, J.A. Martens, S. Lenaerts // *ChemSusChem*. — 2017. — Vol. 10. — Is. 7. — Pp. 1413–1418. DOI: 10.1002/cssc.201601806.
10. *Бобович Б. Б.* Отработанные автомобильные катализаторы — крупный источник вторичных драгоценных металлов / Б. Б. Бобович, А. П. Савко // *Известия Московского государственного технического университета МАМИ*. — 2012. — Т. 2. — № 2 (14). — С. 21–25.
11. *V. Ye. Leonov.* Research and Development of Effective Technology for Air Basin Protection While Ship Operation. / V. Ye. Leonov, A. D. Serdyuk // *Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова*. — 2018. — Т. 10. — № 4. — С. 770-782. DOI:10.21821/2309-5180-2018-10-4-770-782.

REFERENCES

1. *MARPOL: articles, protocols, annexes, unified interpretations of the International Convention for the Prevention of Pollution from Ships, 1973, as modified by the Protocol of 1978 relating thereto.* Consolidated ed. London: International Maritime Organization, 2017.
2. *International Safety Management (ISM) Code with guidelines for its implementation.* London: International Maritime Organization, 2018.
3. Leonov, V.Ye., M.V. Chepok, and R.A. Drobitko. “Puti povysheniya ehnergeticheskoy ehffektivnosti i ehkologicheskoy bezopasnosti morskikh gruzoperevozok.” *XI Mezhdunarodnaya konferenciya «Strategiya kachestva v promyshlennosti i obrazovanii»*. Vol. 2. Bolgariya, Varna: Technical University, 2015. 87–93.
4. Leonov, V.Ye. “Research and Development of Technical Solutions for the Protection of the Air Basin in the Operation of Ships.” *East European Science Journal* 12(28) (2017): 30–38.
5. Winnes, Hulda, Linda Styhre, and Erik Fridell. “Reducing GHG emissions from ships in port areas.” *Research in Transportation Business & Management* 17 (2015): 73–82. DOI: 10.1016/j.rtbm.2015.10.008
6. A technical summary of Euro 6/VI vehicle emission standards. Web. 10 June 2018 <https://www.theicct.org/sites/default/files/publications/ICCT_Euro6-VI_briefing_jun2016.pdf>.
7. *Zorin, A. V., I. V. Lukiyanchuk, M. A. Medkov, V. V. Permyakov, V. S. Rudnev, and N. I. Steblevskaya.* “Nekotorye vidy kataliticheskikh nejtralizatorov, poluchaemyh ehkstrakcionnopyroliticheskim metodom.” *Territoriya novykh vozmozhnostei. Vestnik Vladivostokskogo gosudarstvennogo universiteta ekonomiki i servisa* 4 (2010): 191–196.
8. *Volnov, A. S., L. N. Tretiak, and E.M. Gerasimov.* “New approaches to purification of the fulfilled gases of internal combustion engines.” *Vestnik of the Orenburg State University* 10(171) (2014): 36–43.
9. *Verbruggen, Sammy W., Myrthe Van Hal, Tom Bosserez, Jan Rongé, Birger Hauchecorne, Johan A. Martens, and Silvia Lenaerts.* “Inside Back Cover: Harvesting Hydrogen Gas from Air Pollutants with an Unbiased Gas Phase Photoelectrochemical Cell.” *ChemSusChem* 10.7 (2017): 1413–1418 DOI: 10.1002/cssc.201601806
10. *Bobovich, B. B., and A. P. Savko.* “Used automotive catalysts as major sources of secondary precious metals.” *Izvestiya Moskovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta MAMI* 2.2(14) (2012): 21–25.
11. *V. Ye. Leonov.* Research and Development of Effective Technology for Air Basin Protection While Ship Operation / V. Ye. Leonov, A. D. Serdyuk // *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova*. 10(4) (2018): 770-782. DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-4-770-782.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Леонов Валерий Евгеньевич —
доктор технических наук, профессор
Херсонская государственная морская академия
73000, Украина, Херсон, пр. Ушакова, 20
e-mail: leonov_v_e@i.ua
Сердюк Александр Дмитриевич —
второй помощник капитана теплохода
m/v “Maria-1”
Херсонский морской торговый порт
73000, Украина, Херсон, ул. Потемкинская, 3
e-mail: alexanderserdyuk@ukr.net

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Leonov, Valeriy Ye. —
Dr. of Technical Sciences, professor
Kherson State Maritime Academy
20 Ushakova Avenue, Kherson, 73000, Ukraine
e-mail: leonov_v_e@i.ua
Serdyuk, Alexander D. —
Second officer, m/v “Maria-1”
Kherson sea port
3 Potemkinskaya Str., 73000,
Kherson, Ukraine
e-mail: alexanderserdyuk@ukr.net

*Статья поступила в редакцию 14 июня 2018 г.
Received: June 14, 2018.*

DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-5-1025-1039

HEAT FLOW RATE CHART FOR STEAM AND CONDENSATE ANALYZE CO-GENERATION STEAM TURBINE PLANTS USE REGIMES FLOATING OBJECTS WITH NUCLEAR POWER PLANT

V. I. Korolev

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

At present, the issues of rational use of steam turbine installations of floating facilities with a nuclear power-plant, intended for generation of heat and electric energy for external consumption. This is due to the fact that in the near future the world's first floating nuclear thermal power plant "Akademik Lomonosov" will be put into operation. The specifics of the location of such facilities in hard-to-reach regions with a deficit of thermal and electric energy pose challenges for the optimal use of nuclear energy from floating objects in new conditions. At the same time, a certain experience has been accumulated in the rational use of thermal steam turbine units in large energy systems. Until now, the possibility of using such facilities in small closed energy systems (clusters) has not been considered. It is necessary to form an approach to solving the problem of the rational use of floating nuclear thermal power plants under the new conditions.

An approach is formed in the work to understand the features of the new tasks that are faced by operating personnel of floating objects with a nuclear power plant. Various approaches to the determination of the efficiency of the heating plants during the tempering of the combined energy are analyzed. To perform the analysis, it is proposed to use a heat-flow diagram of steam and condensate, which provides visualization of thermal and material balances for various modes of using the combined energy of a steam-turbine plant. The effectiveness of the application of the heat-consumption diagram is discussed using the example of the steam-turbine installation of the floating power unit "Akademik Lomonosov". In this case, three basic calculation modes of operation of the steam turbine plant are considered: condensate nominal, rated at nominal, condensate maximum. Heat-consumption diagrams are compared for the condensed nominal, heating nominal. On the basis of the comparison of heat-consumption diagrams, conclusions are drawn regarding the efficiency of using heat received from a nuclear reactor for use on external consumption

Keywords: floating object, a nuclear power plant, floating power unit, cluster, district heating plant, electrical energy, heat energy, efficiency of heating units, steam extraction, rotary diaphragm, the pressure in the sampling, steam, condensate, diagram.

For citation:

Korolev, Vladimir I. "Heat flow rate chart for steam and condensate analyze co-generation steam turbine plants use regimes floating objects with nuclear power plant". *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova* 10.5 (2018): 1025–1039. DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-5-1025-1039.

УДК 629.12-8: 621.039

ТЕПЛОРАСХОДНАЯ ДИАГРАММА ПАРА И КОНДЕНСАТА ДЛЯ АНАЛИЗА РЕЖИМОВ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ТЕПЛОФИКАЦИОННЫХ ПАРОТУРБИННЫХ УСТАНОВОК

В. И. Королёв

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

*В настоящее время актуальными становятся вопросы рационального использования паротурбинных установок плавучих объектов с ядерной энергетической установкой, предназначенных для генерации тепловой и электрической энергии на внешнее потребление. Это связано с тем, что в ближайшее время будет введена в эксплуатацию **первая в мире** плавучая атомная теплоэлектростанция «Академик Ло-*

моносов». Специфика размещения таких объектов в труднодоступных регионах с дефицитом тепловой и электрической энергии выдвигает задачи по оптимальному использованию ядерной энергии от плавучих объектов в новых условиях. При этом накоплен определенный опыт рационального применения теплофикационных паротурбинных установок в составе больших энергетических систем. До сих пор не рассматривалась возможность использования таких установок в составе малых замкнутых энергетических систем (кластерах). В предлагаемой статье формируется подход к пониманию особенностей новых задач, которые стоят перед эксплуатационным персоналом плавучих объектов с ядерной энергетической установкой. Анализируются различные подходы к определению эффективности теплофикационных установок при отпуске комбинированной энергии. Для проведения анализа предлагается использовать теплорасходную диаграмму пара и конденсата, обеспечивающую визуализацию тепловых и материальных балансов для различных режимов использования комбинированной энергии паротурбинной установки. Обсуждается эффективность применения теплорасходной диаграммы на примере паротурбинной установки плавучего энергоблока «Академик Ломоносов». При этом рассматриваются три базовых расчетных режима работы паротурбинной установки: конденсатный номинальный, теплофикационный номинальный, конденсатный максимальный. Сопоставляются теплорасходные диаграммы для конденсатного номинального и теплофикационного номинального режимов. На основании сопоставления теплорасходных диаграмм делаются выводы об эффективности использования теплоты, полученной от ядерного реактора, для использования на внешнее потребление.

Ключевые слова: плавучий объект, ядерная энергетическая установка, плавучий энергоблок, кластер, теплофикационная установка, электрическая энергия, тепловая энергия, эффективность теплофикационных установок, регулируемый отбор пара, поворотная диафрагма, давление в отборе, пар, конденсат, диаграмма.

Для цитирования:

Королёв В. И. Теплорасходная диаграмма пара и конденсата для анализа режимов использования теплофикационных паротурбинных установок / В. И. Королёв // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2018. — Т. 10. — № 5. — С. 1025–1039. DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-5-1025-1039.

Введение (Introduction)

В настоящее время на ООО «Балтийский завод. Судостроение» фактически построен плавучий энергоблок (ПЭБ) с ядерной энергетической установкой (ЯЭУ) «Академик Ломоносов». Данный энергоблок будет транспортирован в г. Певек (Чукотский автономный округ) и войдет в состав плавучей атомной теплоэлектростанции (ПАТЭС). В настоящее время в г. Певеке строится наземная часть ПАТЭС, которая значительно удорожает стоимость ПАТЭС в целом и делает проект менее привлекательным для коммерческих целей, что отмечается в работах [1]–[3]. По классификации Российского морского регистра судоходства, ПЭБ относится к стоечным судам и будет первым плавучим объектом (ПО) с ЯЭУ, не имеющим собственного движителя. В работах [1], [2] прогнозируется увеличение количества ПО с ЯЭУ для различных целей российской экономики. При этом прототипом реакторной установки (РУ) данных объектов, вероятнее всего, будут ныне используемые на атомных ледоколах реакторы. В частности, установленная на ПЭБ «Академик Ломоносов» РУ мало отличается от РУ, которыми укомплектованы действующие атомные ледоколы. При этом на атомных ледоколах энергия РУ в основном используется для обеспечения движения, и небольшая ее часть — на собственные нужды ЯЭУ и обитаемость судна. В отличие от атомных ледоколов, на ПЭБ энергия РУ в основном используется для производства тепловой и электрической энергии на внешнее потребление и лишь небольшая часть энергии расходуется на собственные нужды (рис. 1).

Основным продуктом ПЭБ является комбинированная энергия: электрическая $N_э$ и тепловая $Q_{тп}$. В этой связи при эксплуатации ПЭБ возникают новые задачи по рациональному использованию энергии РУ в наземных условиях. Возможны несколько вариантов использования энергии ПЭБ. Во-первых, ПЭБ может работать в составе изолированной энергосистемы (в кластере), в которую включено некоторое число других источников энергии, работающих на органическом топливе. Во-вторых, ПЭБ может быть самостоятельным источником энергии (единичным) для наземных потребителей. Возможны и другие, менее вероятные, варианты использования

ПЭБ, например, в составе других атомных станций малой мощности (АСММ) с наземным базированием.

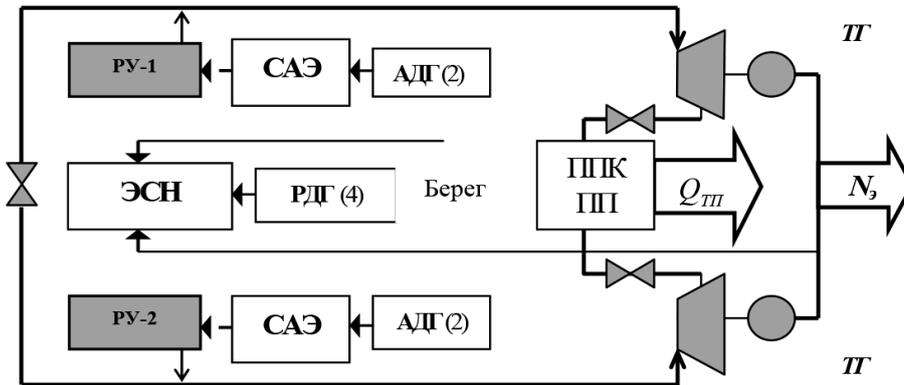


Рис. 1. Структурная схема энергетической оснащённости ПЭБ «Академик Ломоносов»:

РУ-1,2 — реакторные установки; САЭ — система аварийного электроснабжения;

ЭСН — электроснабжение собственных нужд; ТГ — турбогенератор;

АДГ — аварийный дизель-генератор; РДГ — резервный дизель-генератор;

ППК — подогреватели промежуточного (теплофикационного) контура; ПП — пиковые подогреватели;

$Q_{ТП}$ — энергия, идущая на внешнее тепловое потребление;

$N_э$ — энергия, идущая на внешнее электрическое потребление

В каждом из рассмотренных вариантов возникает задача оптимального использования энергии ядерного и органического топлива. При этом определяющими факторами могут быть стоимость ядерного и органического топлива для данного региона, а также коэффициенты использования энергии топлива (КПД) на каждом энергетическом объекте кластера. При этом соотношение и количество тепловой и электрической энергии, поступающей потребителям, будет изменяться в широком диапазоне в зависимости от сезона, дня недели, времени суток, состава энергетических источников, включенных в кластер (систему), что подробно рассмотрено применительно к большой энергетической системе в работе [4].

Методы и материалы (Methods and Materials)

При рассмотрении вариантов оптимального включения тепломеханического оборудования в паротурбинную установку (ПТУ) используется анализ термодинамических циклов. При этом сопоставляются термодинамические КПД (коэффициенты использования теплоты первичного источника) сопоставляемых циклов. Для анализа термодинамические циклы обычно строятся в координатах Ts -диаграммы (температура – энтропия). При комбинированном отпуске тепловой и электрической энергии возникает необходимость обеспечения автономности этих энергий.

На рис. 2, а показана простая теплофикационная ПТУ, на рис. 2, б — ее термодинамический цикл. Здесь допустимо определенное изменение тепловой нагрузки при постоянной электрической энергии, и, наоборот, изменение электрической нагрузки при постоянной тепловой. Если вообще отсутствует тепловая нагрузка, то турбина работает в конденсационном режиме. Анализ различных вариантов теплофикационных ПТУ рассмотрен в работах [5], [6].

Цикл теплофикационной установки в Ts -диаграмме можно условно рассматривать как совокупность двух циклов: с противодавлением и конденсационного (см. рис. 2, б). Поток пара частично расширяется в турбине до противодавления p_1 (точка 1 на рис. 2, б), и в турбине срабатывается изоэнтروпийный перепад энтальпий, эквивалентный отрезку $\theta-1$. Другая часть потока продолжает расширяться в турбине, и срабатывается изоэнтропийный перепад энтальпий, эквивалентный отрезку $\theta-2$.

Изменяя положение регулирующего органа (РО) при заданном значении G_0 , можно перераспределять потоки пара, идущие на теплофикацию и в проточную часть турбины после тепло-

фикационного отбора. При этом если расход на теплофикацию растет, то увеличивается мощность турбины на теплофикационном потреблении и одновременно снижается конденсационная мощность турбины.

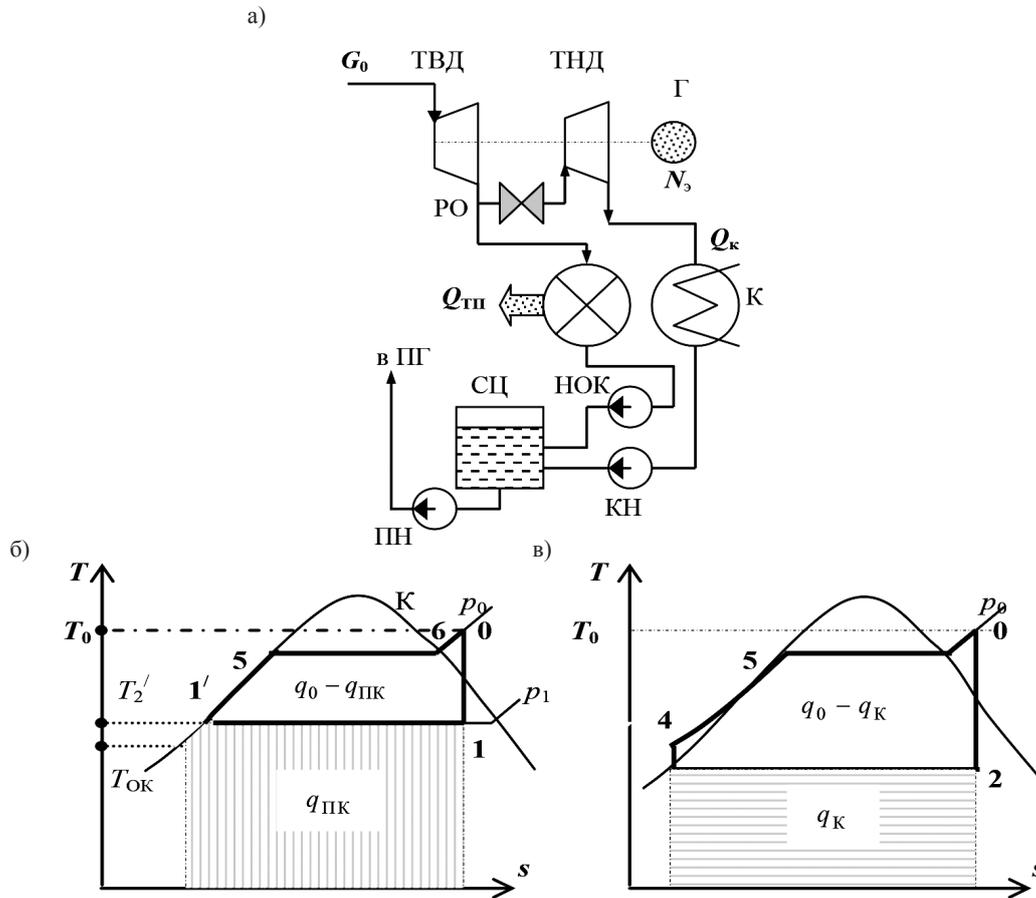


Рис. 2. Термодинамический цикл ПТУ с теплофикацией:

a — схема соединения основного оборудования для реализации термодинамического цикла ПТУ с отбором теплоты на внешнее потребление; *б* — цикл потока, идущего в отбор на теплофикацию (теплофикационный поток); *в* — цикл потока, идущего в конденсатор (конденсационный поток):

НОК — насос обратных конденсатов; СЦ — сборная цистерна;

РО — регулирующий орган

На действующих судах с ЯЭУ потребление пара на теплообменное оборудование (испарительные установки, парогенераторы низкого давления, пароструйные эжектора и т. д.) составляет 3–4 % от общей производительности парогенераторов. При этом возврат конденсата греющего пара осуществляется в деаэратор или главный конденсатор. Как показано в работе [5], эти отборы пара оказывают незначительное влияние на КПД пароконденсатного цикла в целом. Однако, если отбор пара на тепловые потребители составляет более 10 %, то влияние его на экономические показатели паротурбинного цикла будет достаточно ощутимым. К таким установкам относятся теплофикационные паротурбинные установки. В них осуществляется комбинированное производство электрической и тепловой энергии.

Для дальнейшего анализа рассмотрим более сложную теплофикационную ПТУ, в которой поддерживается температура питательной воды перед парогенераторами (это необходимо для использования ПТУ в составе РУ) — рис. 3, *a*. Здесь отбор пара на теплофикацию разделяет турбину на два отсека с разными массовыми расходами пара. На тепловое потребление в подогреватель воды промежуточного контура (ПВПК) поступает пар в количестве $G_{\text{ТП}}$, а в конденсатор главной турбины — соответственно $G_{\text{К}} = G_0 - G_{\text{СП}} - G_{\text{ТП}}$.

Если относительная доля отбора пара на теплофикацию в ПВПК $\bar{G}_{\text{ТП}} = G_{\text{ТП}}/G_0 \approx 0$, то турбина работает в чисто конденсационном режиме (максимальная электрическая мощность), а при $\bar{G}_{\text{ТП}} = 1$ турбина работает с противодавлением (минимальная электрическая мощность). Значение минимальной электрической мощности при заданных начальных параметрах пара будет зависеть от давления пара в отборе. При этом чем больше принятое давление в отборе, тем меньше минимальная мощность. В работах [7] и [8] оценивается эффективность различных ПТУ с комбинированной выработкой тепловой и электрической энергии в зависимости от давления в теплофикационном отборе.

Наряду с Ts -диаграммой для анализа режимов работы теплофикационных ПТУ предлагается использовать h, G -диаграмму (теплорасходную диаграмму), дающую наглядное представление о распределении располагаемой энергии пара и конденсата для производства тепловой и электрической энергии. На рис. 3, а показана тепловая схема, к которой на рис. 3, б рассмотрен вариант теплорасходной диаграммы. Здесь по оси абсцисс отложен расход пара и конденсата, используемых при составлении материального баланса пара и конденсата. По оси ординат отложено теплосодержание (энтальпия) потоков пара и конденсата, которые используются в тепловом балансе пара и конденсата. Произведение величин изменения теплосодержания (энтальпии) потоков пара и конденсата на расход этих сред можно представить в виде тепловой и электрической мощности, полученных от этих рабочих сред. В графическом изображении данные величины пропорциональны площадям прямоугольников, полученных в координатах теплорасходной диаграммы.

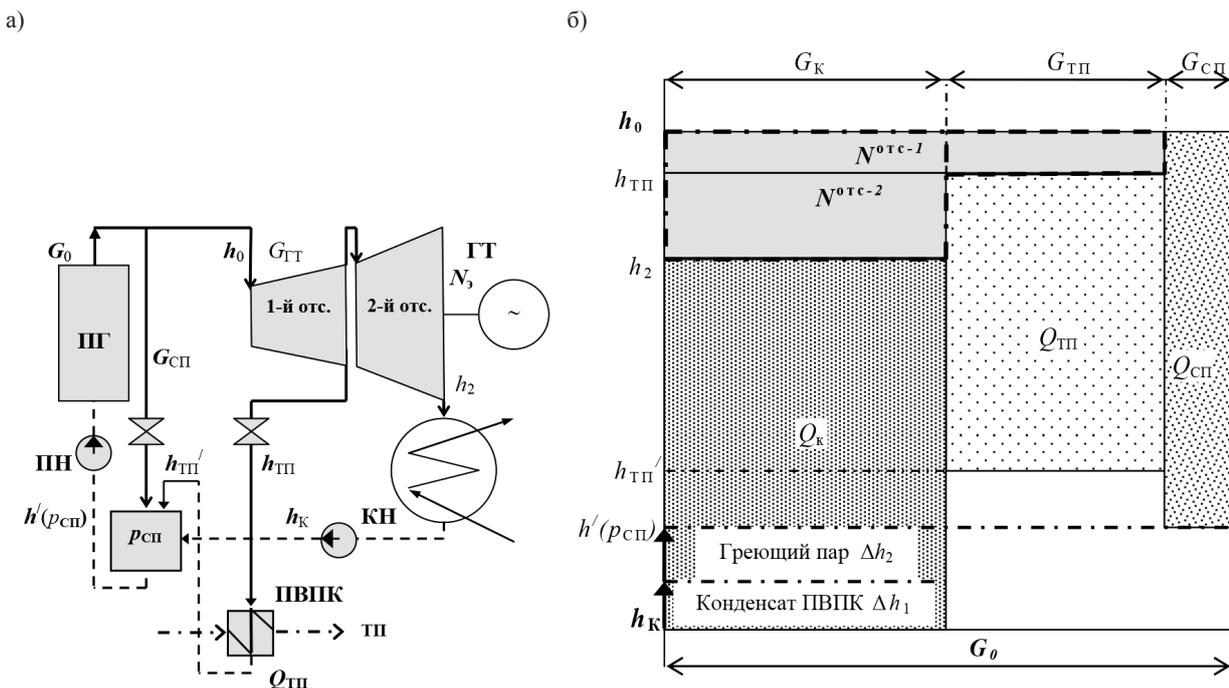


Рис. 3. Комбинированная паротурбинная установка с теплофикацией:
 а — тепловая схема; б — теплорасходная диаграмма пара и конденсата

Таким образом, мощность, полученная в первом и втором отсеках турбины от потоков пара, соответственно $(G_0 - G_{\text{СП}})$ и $(G_0 - G_{\text{СП}} - G_{\text{ТП}})$, а также суммарная мощность турбины могут быть представлены в координатах теплорасходной диаграммы площадями соответствующих прямоугольников:

$$N_{\text{т}}^{\text{отс-1}} = G_0(1 - \bar{G}_{\text{СП}})(h_0 - h_{\text{ТП}}); \quad (1)$$

$$N_{\text{т}}^{\text{отс-2}} = G_0(1 - \bar{G}_{\text{СП}} - \bar{G}_{\text{ТП}})(h_{\text{ТП}} - h_2); \quad (2)$$

$$N_T = N_T^{\text{отс-1}} + N_T^{\text{отс-2}}, \quad (3)$$

где $G_0, G_{\text{СП}}, G_{\text{ТП}}$ — расходы пара, соответственно, парогенератором, на подогрев питательной воды и на теплофикацию; $h_0, h_{\text{ТП}}$ — энтальпии пара, соответственно, свежего (генерируемого в ПГ) и идущего из отбора на теплофикацию; $\bar{G}_{\text{СП}} = \frac{G_{\text{СП}}}{G_0}$; $\bar{G}_{\text{ТП}} = \frac{G_{\text{ТП}}}{G_0}$.

В соответствии с рис. 3 на теплофикацию передается теплота, представленная в теплорасходной диаграмме в виде прямоугольника с площадью, эквивалентной величине

$$Q_{\text{ТП}} = G_{\text{ТП}}(h_{\text{ТП}} - h'_{\text{ТП}}), \quad (4)$$

где $h'_{\text{ТП}}$ — удельная энтальпия конденсата греющего пара в ПВПК.

При этом в конденсатор поступает конденсационный поток, уносящий с собой теплоту, эквивалентную площади прямоугольника, изображенного в координатах теплорасходной диаграммы:

$$Q_k = G_0(1 - \bar{G}_{\text{СП}} - \bar{G}_{\text{ТП}})(h_2 - h_k) = G_k(h_2 - h_k), \quad (5)$$

где G_k — расход пара в конденсаторе; h_k — энтальпия конденсата пара в конденсаторе.

На подогрев конденсата в смешивающий подогреватель поступает конденсат пара, полученный в ПВПК, и свежий пар (см. рис. 3, а). В смешивающем подогревателе поддерживается кипение при давлении $p_{\text{СП}}$, и для этого в него подается свежий пар. Количество теплоты, поступающей на подогрев питательной воды от конденсата из ПВПК и от свежего греющего пара, соответственно, равно:

$$Q_k^{\text{П}} = G_{\text{ТП}}(h'_{\text{ТП}} - h_k); \quad (6)$$

$$Q_{\text{СП}} = G_{\text{СП}}[h_0 - h'(p_{\text{СП}}) - h_k]. \quad (7)$$

В результате смешения потоков энтальпия конденсата (питательной воды, если учитывать небольшой подогрев в питательном насосе) возрастает на величину

$$\Delta h_1 + \Delta h_2 = \frac{1}{G_0} \left\{ G_{\text{ТП}}(h'_{\text{ТП}} - h_k) + G_{\text{СП}}[h_0 - h'(p_{\text{СП}}) - h_k] \right\}, \quad (8)$$

что также отражено на теплорасходной диаграмме (в виде вертикальных стрелок) — см. рис. 3, б.

Количество подведенной в парогенераторе теплоты с учетом подогрева конденсата (питательной воды) в смешивающем подогревателе равно

$$Q_{\text{ПГ}} = G_0[h_0 - h'(p_{\text{СП}})]. \quad (10)$$

Если подогрев питательной воды отсутствует, то в парогенератор подводится теплота, эквивалентная общей площади прямоугольника в координатах теплорасходной диаграммы:

$$Q_{\text{ПГ}}^* = G_0(h_0 - h_k). \quad (11)$$

При анализе режимов работы теплофикационных ПТУ принимается, что суммарная мощность турбины складывается из мощностей, полученных, соответственно, теплофикационным $N_T^{\text{П}}$ и конденсационным потоками $N_T^{\text{К}}$ [4], [7], [8]:

$$N_T^{\text{П}} = G_{\text{ТП}}(h_0 - h_{\text{ТП}}); \quad (12)$$

$$N_T^{\text{К}} = G_0(1 - \bar{G}_{\text{СП}} - \bar{G}_{\text{ТП}})(h_0 - h_2); \quad (13)$$

$$N_T = N_T^{\text{П}} + N_T^{\text{К}} = G_0 \left[(h_0 - h_{\text{ТП}}) \bar{G}_{\text{ТП}} + (h_0 - h_2) (1 - \bar{G}_{\text{СП}} - \bar{G}_{\text{ТП}}) \right]. \quad (14)$$

На рис. 3, б соответствующие прямоугольники обведены пунктирными и штрихпунктирными линиями.

Результаты (Results)

Для анализа эффективности комбинированного производства электроэнергии можно рассматривать несколько подходов [4], [7]–[10] (рис. 4). В первом варианте (подходе) считается, что тепловому потребителю отдается теплота $Q_{ТП} = G_{ТП} (h_{ТП} - h'_{ТП})$, а оставшая теплота $Q_3 = G_0 [h_0 - h' (p_{СП})] - Q_{ТП}$ идет на производство электроэнергии. Такой вариант определения эффективности теплофикационных установок в технической литературе имеет название «нормативный метод» [4]. При этом частный КПД турбоустановки будет равен

$$\eta_{(1)} = \frac{N_T}{Q_{ПГ} - Q_{ТП}} = \frac{(h_0 - h_{ТП}) \bar{G}_{ТП} + (h_0 - h_2)(1 - \bar{G}_{СП} - \bar{G}_{ТП})}{h_0 - h' (p_{СП}) - (h_{ТП} - h'_{ТП}) \bar{G}_{ТП}}. \quad (15)$$

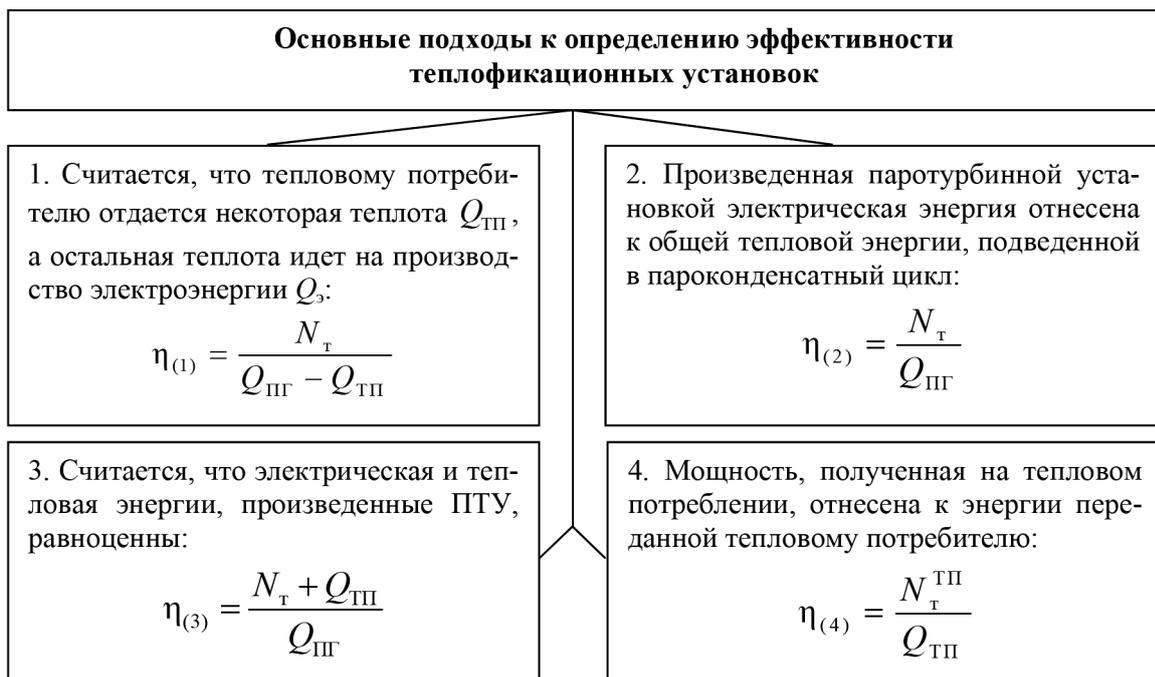


Рис. 4. Основные подходы к определению эффективности теплофикационных установок

Во втором варианте (подходе) произведенная паротурбинной установкой энергия отнесена к общей тепловой энергии, подведенной в пароконденсатный цикл:

$$\eta_{(2)} = \frac{N_T}{Q_{ПГ}} = \frac{(h_0 - h_{ТП}) \bar{G}_{ТП} + (h_0 - h_2)(1 - \bar{G}_{СП} - \bar{G}_{ТП})}{h_0 - h' (p_{СП})}. \quad (16)$$

В третьем варианте считается, что электрическая и тепловая энергии, произведенные ПТУ, равноценны. При таком подходе КПД установки определяется по формуле

$$\eta_{(3)} = \frac{N_T + Q_{ТП}}{Q_{ПГ}} = \frac{(h_0 - h_{ТП}) \bar{G}_{ТП} + (h_0 - h_2)(1 - \bar{G}_{СП} - \bar{G}_{ТП}) + (h_{ТП} - h'_{ТП}) \bar{G}_{ТП}}{h_0 - h' (p_{СП})}. \quad (17)$$

Согласно нормативному методу, вторым показателем, характеризующим эффективность теплофикационной ПТУ, является удельная мощность теплофикационного потока (удельная выработка электроэнергии на тепловом потреблении):

$$\eta_{(4)} = \frac{N_T^{ТП}}{Q_{ТП}} = \frac{h_0 - h_{ТП}}{h_{ТП} - h'_{ТП}}. \quad (18)$$

Рассмотрим первый вариант. Здесь по мере роста величины относительного отбора на тепловое потребление $\bar{G}_{ТП} \rightarrow 1$ $\eta_{(1)}$ сначала медленно, а затем резко возрастает. Одновременно со сни-

жением электрической мощности растет тепловая мощность ПВПК ($Q_{ТП}$) и уменьшается необходимая добавка свежего пара в СП для поддержания $h'(p_{СП}) = \text{const}$. В пределе $\bar{G}_{СП} \rightarrow 0$ и $Q_{СП} \rightarrow 0$, а значит, $h'(p_{СП}) \approx h'_{ТП}$ и в соответствии с формулой (15) $\eta_{(1)} \approx 1$, т. е. при $\bar{G}_{ТП} = 1$ потеря в холодном источнике (конденсаторе) близка к нулю.

Во втором варианте при росте величины относительного отбора на тепловое потребление $\bar{G}_{ТП} \rightarrow 1$ турбина сначала работает в чисто конденсационном режиме, затем переходит в режим работы с противодавлением, и $\eta_{(2)}$, как видно из формулы (16), снижается по отношению к начальному значению, когда расход на теплофикацию был мал. Следовательно, данный показатель не отражает целесообразность использования мощности реактора для теплофикации.

При рассмотрении третьего варианта, если считать электрическую и тепловую энергии равноценными, то по мере увеличения значения относительного потребления пара на теплофикацию $\bar{G}_{ТП} \rightarrow 1$, в соответствии с формулой (17), $\eta_{(3)}$ возрастает линейно и в пределе равен единице.

Показатель, оцененный по формуле (18), учитывает начальные параметры пара, изоэнтروпийный перепад энтальпий в отсеке турбины, использующей теплофикационный поток, и внутренний относительный КПД отсека (параметры пара в отборе). При сравнении вариантов ПТУ с теплофикацией лучше будет та, у которой больше $\eta_{(4)}$.

На практике при оценке эффективности теплофикационных установок при помощи нормативного метода используется величина, обратная $\eta_{(1)}$, т. е. удельный расход теплоты на производство электрической энергии:

$$q = \frac{Q_{ПГ} - Q_{ТП}}{N_T} = \frac{q_T N_T^{ТП} + q_K N_T^K}{N_T^{ТП} + N_T^K}, \quad (19)$$

где q_T, q_K — удельные расходы теплоты на выработку электрической энергии теплофикационным и конденсационными потоками соответственно.

Обсуждение (Discussion)

Далее используем результат применения теплорасходной диаграммы пара и конденсата на реальной теплофикационной ПТУ, установленной на ПЭБ «Академик Ломоносов». На рис. 5 показана принципиальная схема пароконденсатного цикла ПЭБ. В составе пароконденсатного цикла впервые используются два турбоагрегата теплофикационного типа с регулируемым отбором пара типа ТК-35/38-3,4с, изготовленные на ОАО «Калужский турбинный завод». Регулирование отбора осуществляется при помощи поворотной диафрагмы. Более подробное описание особенностей проточной части турбины приведено в работе [11], а анализ существующих термодинамических и функциональных связей тепломеханического оборудования, включенного в пароконденсатный цикл, приведен в работе [5].

Регулирующим органом турбины в теплофикационном отборе является поворотная дроссельная диафрагма, при помощи которой изменяется давление пара в регулируемом отборе. При нормальной работе ПТУ деаэратор переключается на питание паром из регулируемого отбора. На частичных нагрузках, когда давление в теплофикационном отборе ниже значения 0,12 МПа, деаэратор переключается на питание паром из отбора высокого давления. В режимах нормальной эксплуатации турбины ПЭБ работают в диапазоне нагрузок в соответствии с потребностью энергосети. Возможна работа на мощности в диапазоне изменения электрической и тепловой нагрузок от нуля до 100 % номинальных величин и в режиме холостого хода. Предусмотрена возможность работы с электрической мощностью более 100 % номинальной при уменьшении расхода пара на теплофикацию, а также работа с тепловой мощностью до 2·84,7 МВт (2·73 Гкал/ч) при сниженной электрической мощности. Предусматривается работа с отключенными по пару подогревателями питательной воды, а также работа при температуре заборной воды до 35 °С с ограничением тепловой или электрической мощности до 31,4 МВт.

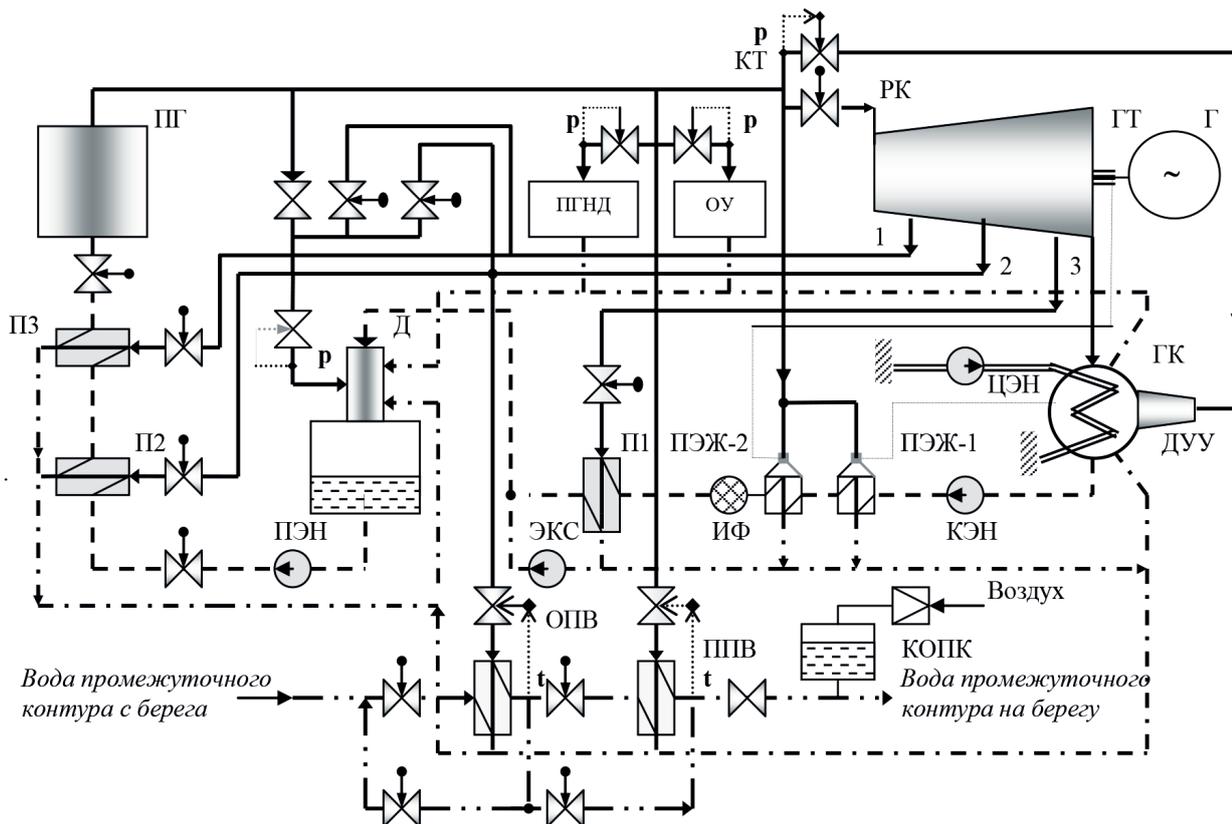


Рис. 5. Принципиальная схема пароконденсатного цикла ПЭБ:

ПГ — парогенератор; ГТ — главная турбина; Г — генератор; ГК — главный конденсатор; ДУУ — дроссельно-увлажнительное устройство; КЭН — конденсатный электронасос; ПЭЖ-1, ПЭЖ-2 — пароструйные эжекторы; ЦЭН — циркуляционный электронасос; ЭКС — электронасос конденсатный сливной; ПЭН — питательный электронасос; П1, П2, ПЗ — подогреватели конденсата и питательной воды; Д — деаэратор; ОПВ — основные подогреватели воды промежуточного контура; ППВ — пиковый подогреватель воды промежуточного контура; КОПК — компенсатор объема промежуточного контура; ПГНД — парогенератор низкого давления; ОУ — опреснительная установка; РК — регулирующий клапан; КТ — клапан травления

На рис. 6 представлены результаты проектных расчетов ряда параметров от относительной электрической мощности ПЭБ. Обычно тепловая нагрузка более стабильна в течение суток, а электрическая нагрузка при этом может изменяться значительно чаще, т. е. возможно маневрирование электрической нагрузкой при сохранении постоянной тепловой. Например, в работе [12] анализируется привлечение ТЭЦ, работающих по тепловому графику, к прохождению провалов графиков электрической нагрузки. В работе [13] предложены рациональные режимы эксплуатации теплофикационных турбин с одноступенчатым подогревом сетевой воды. На рис. 6, а показаны расчетные зависимости расхода пара на турбину, электрической и тепловой мощности на теплофикацию от относительной мощности турбины. Предполагается, что при изменении электрической нагрузки от 10 до 35 МВт тепловая нагрузка остается неизменной: $Q_{\text{ТП}} = 29$ МВт. При этом давление в теплофикационном отборе (2-й отбор) поддерживается постоянным, как показано на рис. 6, в, при некотором росте расхода пара в отбор (рис. 6, б), что связано с увеличением подачи пара на подогреватель высокого давления П-2 (см. рис. 5).

Если тепловая нагрузка при номинальной электрической мощности турбины отключается, то электрическая мощность турбины возрастает сверх номинальной (до ≈ 38 МВт) при том же расходе пара в турбину $G_t = 60$ кг/с. В целом наблюдается рост давления в нерегулируемых отборах и расхода пара в них по мере увеличения электрической мощности турбины. Эффективный

КПД турбины монотонно возрастает с увеличением мощности турбины, как показано на рис. 6, г. При этом при увеличении мощности турбины, из-за сброса тепловой нагрузки, эффективный КПД несколько снижается.

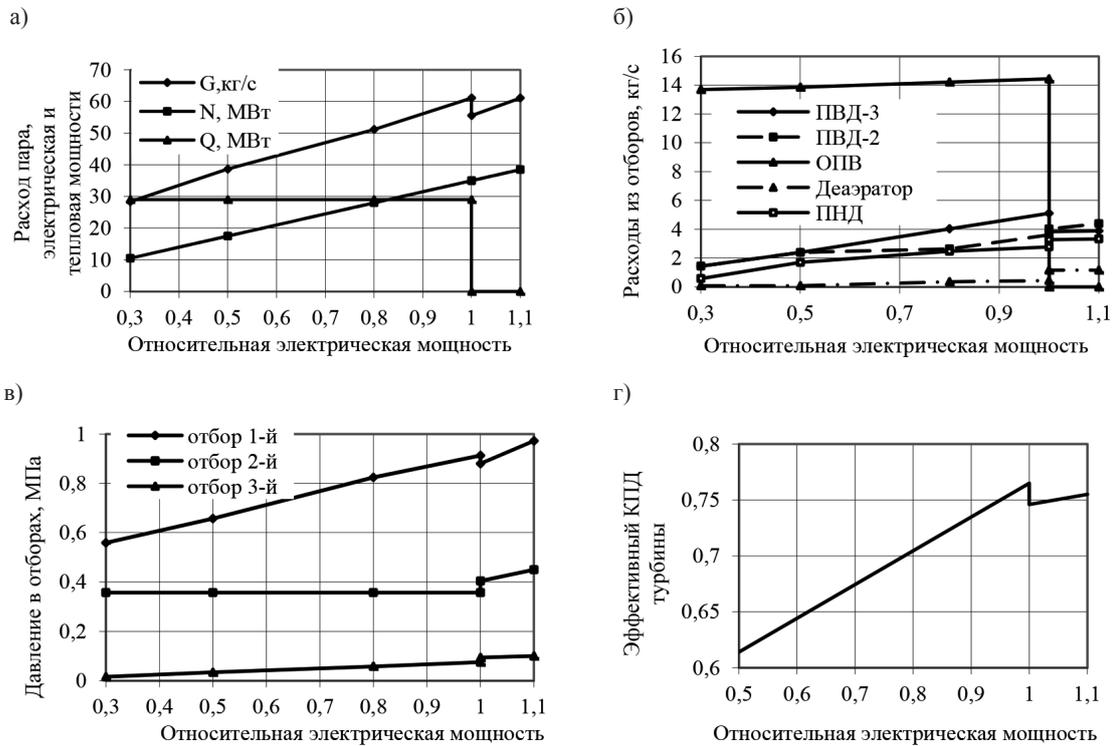
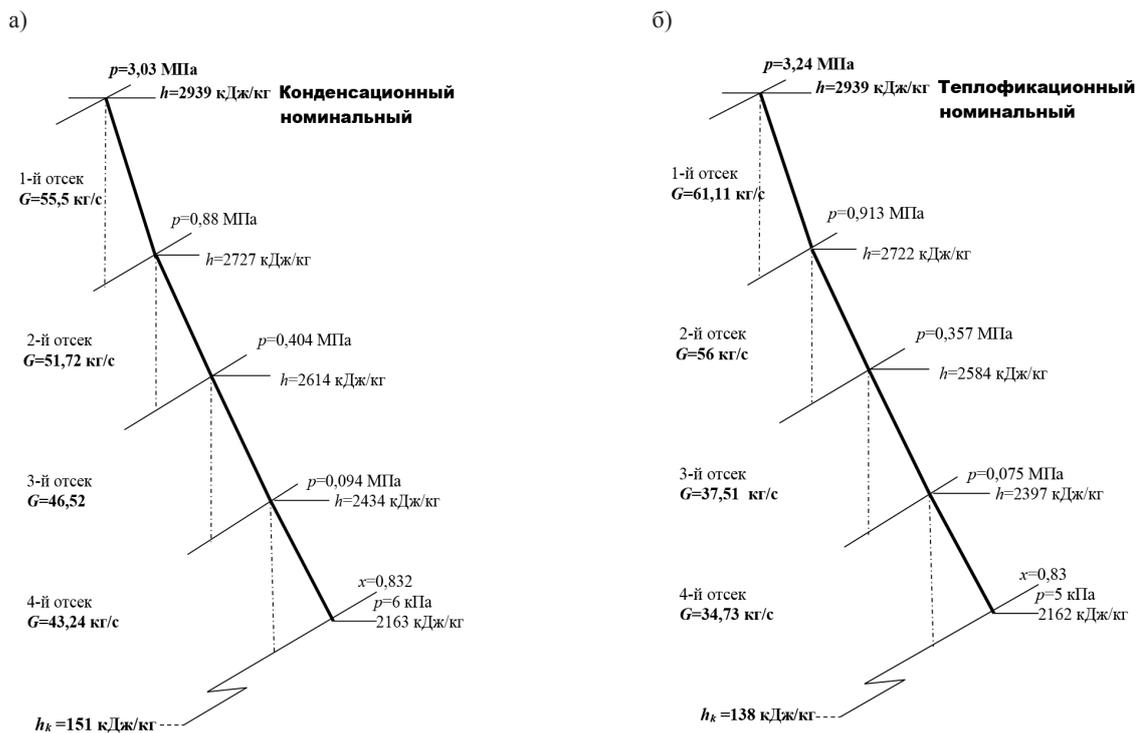


Рис. 6. Зависимость эксплуатационных параметров ПЭБ от относительной электрической мощности:
а — расхода пара, тепловой и электрической мощности;
б — расхода пара из отборов; в — давления пара в отборах; г — эффективного КПД турбины

На рис. 7 показаны процессы расширения пара в турбине для указанных расчетных режимов в координатах h, s -диаграммы.



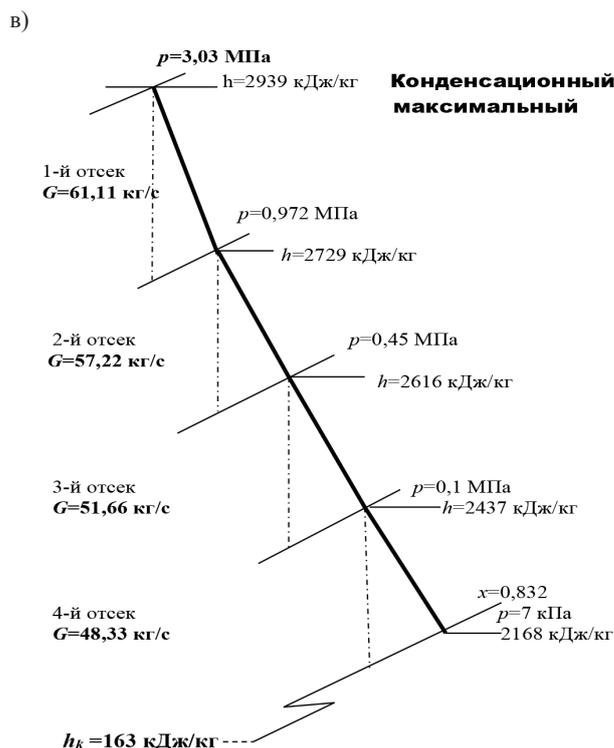


Рис. 7. Процессы расширения пара в турбине для расчетных режимов в координатах h, s -диаграммы:
 a — $N_3 = 35$ МВт, $Q_{\text{ТП}} = 0$; b — $N_3 = 35$ МВт, $Q_{\text{ТП}} = 29$ МВт; $в$ — $N_3 = 38$ МВт, $Q_{\text{ТП}} = 0$

Результаты теплового расчета можно представить в виде наглядной для анализа и обучения теплорасходной диаграммы пара и конденсата (рис. 8).

В таблице приведены результаты сопоставления КПД расчетных режимов по формулам (15)–(18) с использованием теплорасходной диаграммы пара и конденсата. Из расчетов следует, что КПД теплофикационной установки наибольший для номинального теплофикационного режима ее использования. При этом наибольшее значение получается при условии о равноценности тепловой и электрической энергии (формула (17)). При росте теплового потребления КПД будет почти линейно возрастать и отражать в основном эффективность теплового потребления. Если произведенную паротурбинной установкой электрическую энергию отнести к общей тепловой энергии, подведенной в пароконденсатный цикл (формула (16)), то наибольший КПД будет при конденсационном номинальном режиме — 0,2842. При увеличении отбора пара на теплофикацию конденсационный поток уменьшается и, следовательно, КПД будет снижаться по мере роста потребления пара на теплофикацию.

Результаты сопоставления КПД расчетных режимов

Режим работы	Варианты расчетных формул			
	(15)	(16)	(17)	(18)
1. Теплофикационный номинальный $N_3 = 35000$ кВт, $Q_T = 29000$ кВт	0,3287	0,2584	0,4724	0,3895
2. Конденсационный номинальный $N_3 = 35000$ кВт, $Q_T = 0$ кВт	0,2842	0,2842	0,2842	–
3. Конденсационный максимальный $N_3 = 38500$ кВт, $Q_T = 0$ кВт	0,2842	0,2842	0,2842	–

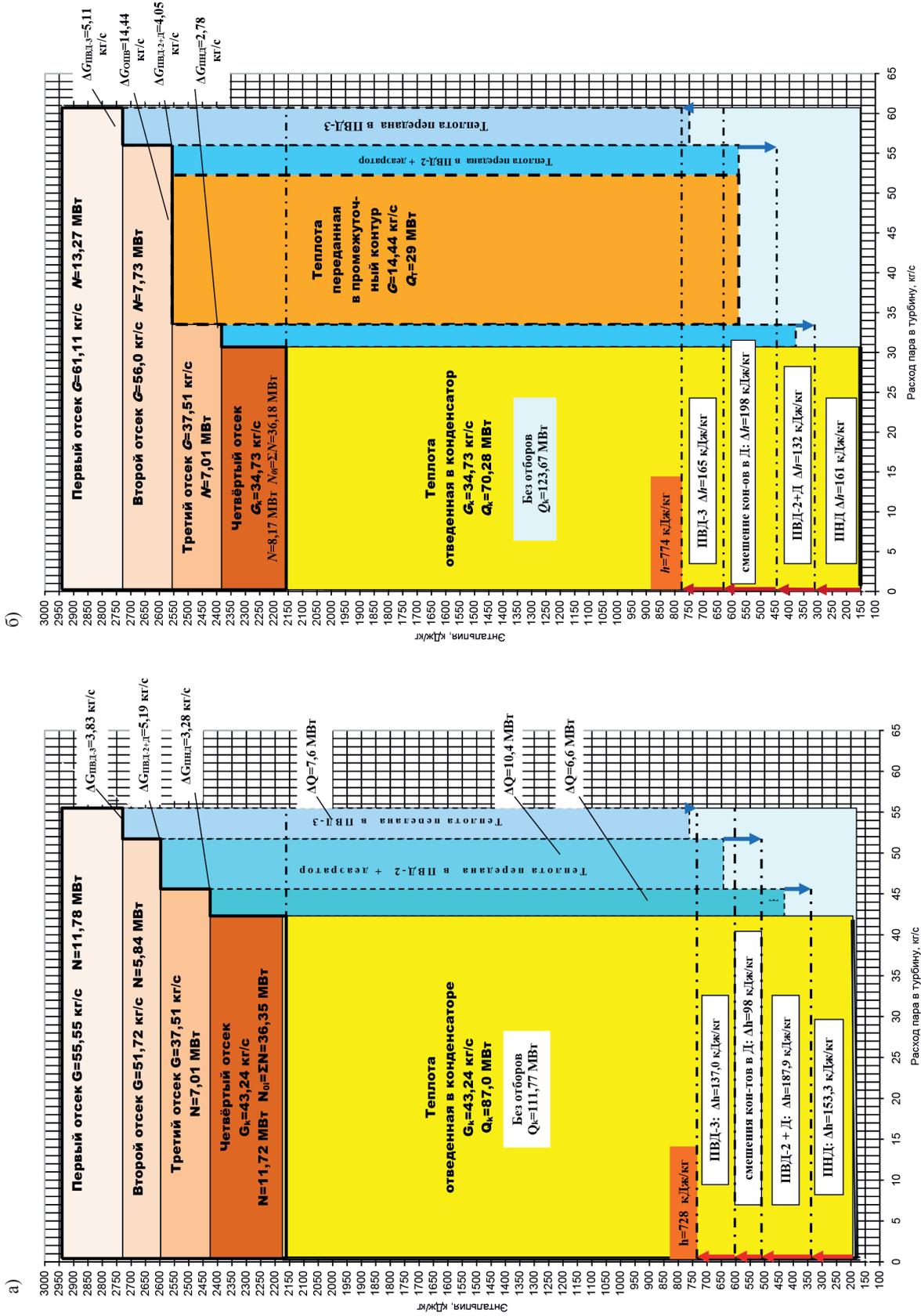


Рис. 8. Теплорасходные диаграммы пара и конденсата для расчетных режимов:

а — $N_3 = 35$ МВт, $Q_{\text{пл}} = 0$; б — $N_3 = 35$ МВт, $Q_{\text{пл}} = 29$ МВт

При максимальном отборе пара на теплофикацию турбина работает с противодавлением, такие турбины имеют значительно меньший КПД по сравнению с конденсационной. Таким образом, в формуле (16) не учитывается значимость теплофикационного режима. В оценках эффективности комбинированного потребления энергии данная формула непригодна.

Оценка эффективности по формуле (15) отражает преимущество комбинированного отпуска энергии внешним потребителям. Здесь теплофикационный номинальный режим имеет более высокое значение КПД, чем конденсационный номинальный. Однако при больших теплофикационных отборах пара КПД будет стремиться к единице, так как в конденсатор будет поступать малое количество отработавшего в турбине пара. Данная ситуация противоречит общепринятым понятиям термодинамики тепловых машин.

Формула (18) применима только для теплофикационных режимов и определяет целесообразность выбора начальных параметров турбины и давления, при котором производится отбор пара на теплофикацию. Варьируя давлением в отборе, можно добиться наивысшего КПД, определяемого по формуле (18) и, таким образом, увеличить эффективность установки при работе с теплофикацией.

Из анализа следует, что в каждом конкретном случае необходимо найти свой показатель для сопоставления вариантов тепловых схем, параметров энергосред, а также режимов комбинированного использования тепловой и электрической нагрузки для паротурбинных установок плавучих АТЭС. Этот показатель должен максимально отражать специфику оптимизационной задачи. В работах [14]–[16] предлагается ряд решений, позволяющих обеспечить повышение надежности и энергетической эффективности городских теплофикационных систем различного исполнения.

Заключение (Conclusion)

Сопоставление теплорасходных диаграмм двух фиксированных режимов (см. рис. 8) показывает, что теплота, отведенная в конденсатор на номинальном теплофикационном режиме, меньше, чем на номинальном конденсационном режиме на 16,75 МВт или на $\approx 20\%$. При этом количество теплоты, отведенной в конденсатор, будет уменьшаться по мере увеличения теплофикационной нагрузки и уменьшения электрической нагрузки. Следовательно, тепловые сбросы в воду, примыкающую к ПЭБ и влияющие на экологию окружающего пространства, будут снижаться при увеличении теплофикационной нагрузки ПЭБ. В результате тепловых сбросов вода вокруг корпуса ПЭБ будет нагреваться, что приведет к росту давления в конденсаторах турбин. С другой стороны, уменьшение тепловых выбросов при преимущественно теплофикационной нагрузке усложнит задачу поддержания необходимой температуры в ледовых ящиках, поскольку других рассеянных источников подогрева охлаждающей заборной воды на ПЭБ нет. Тепловые сбросы ПЭБ могут быть использованы за счет установки тепловых насосов при теплоснабжении населенных пунктов, как показано в работе [17]. В работе [18] производится термодинамическая оценка возможности повышения экономичности теплофикационных турбин с использованием теплового насоса.

Основные выводы:

1. Сформулированы подходы к решению новых задач, возникающих при вводе в эксплуатацию плавучей атомной электростанции «Академик Ломоносов».
2. Проанализированы варианты определения эффективности использования ПТУ с комбинированной электрической и тепловой нагрузками.
3. Предложена теплорасходная диаграмма пара и конденсата в сканируемой визуальной проекции, наглядно отражающая тепловые и материальные балансы паротурбинной установки с комбинированной тепловой и электрической нагрузками.
4. Рассмотрены и проанализированы базовые расчетные режимы работы ПТУ ПЭБ «Академик Ломоносов», и для них сопоставлены теплорасходные диаграммы пара и конденсата.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Михеев В. Л.* Арктика — важнейший оплот геополитики России / В. Л. Михеев, В. И. Королёв, А. Ю. Ластовцев // Вестник Совета Федерации. — 2010. — № 4. — С. 42–47.
2. *Барышников С. О.* Подготовка кадров для плавучих объектов с ядерной установкой в ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова / С. О. Барышников, В. И. Королёв, А. Ю. Ластовцев // Атомный проект. — 2014. — № 19. — С. 19–20.
3. *Королев В. И.* Успешное продвижение ПАТЭС в России и мире возможно при изменении подхода к проектированию и нормативно-правовой документации / В. И. Королёв, В. Л. Михеев, А. Ю. Ластовцев // Материалы тезисов науч.-техн. конф. проф.-преп. сост., науч. сотр. и курсантов. — СПб.: ГМА им. адм. С. О. Макарова, 2011. — С. 348–349.
4. *Иванов В. А.* Режимы мощных паротурбинных установок: монография / В. А. Иванов. — Л.: Энергоатомиздат, 1986. — 248 с.
5. *Королёв В. И.* Особенности формирования и теплового расчета пароконденсатного цикла судов и плавучих энергоблоков с ядерной энергетической установкой / В. И. Королёв, И. И. Костылев, А. Ю. Ластовцев. — СПб.: Бэлл, 2006. — 208 с.
6. *Боровков В. М.* Тепловые схемы ТЭС и АЭС / В. М. Боровков, О. И. Демидов, С. А. Казаров. — СПб.: Энергоатомиздат, 1995. — 392 с.
7. *Волков Э. П.* Энергетические установки электростанций: учебник для вузов / Э. П. Волков, В. А. Ведяев, В. И. Обрезков. — М.: Энергоатомиздат, 1983. — 280 с.
8. *Елизаров Д. П.* Теплотехнические установки электростанций / Д. П. Елизаров. — М.: Энергоатомиздат, 1982. — 264 с.
9. *Ротов П. В.* Сравнение показателей энергетической эффективности ТЭЦ при количественном и качественном регулировании тепловой нагрузки / П. В. Ротов // Электрические станции. — 2015. — № 10 (1011). — С. 19–23.
10. *Шарапов В. И.* Об одной из возможностей повышения энергетической эффективности теплофикационных турбоустановок / В. И. Шарапов // Энергетик. — 2014. — № 8. — С. 51–53.
11. *Королёв В. И.* Анализ технических решений, влияющих на интенсивность эрозионных процессов в проточной части турбины ТК-35/38-3,4с / В. И. Королёв, А. Ю. Ластовцев, Е. И. Гаврилов // Эксплуатация морского транспорта. — 2010. — № 3 (61). — С. 47–52.
12. *Назаров В. И.* Анализ привлечения ТЭЦ, работающей по тепловому графику, к прохождению провалов графиков электрической нагрузки / В. И. Назаров, Л. А. Тарасевич, П. В. Назаров // Энергетика. Известия высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ. — 2013. — № 5. — С. 56–64.
13. *Шубенко А. Л.* Рациональные режимы эксплуатации теплофикационных турбин с одноступенчатым подогревом сетевой воды / А. Л. Шубенко, О. А. Бабенко // Технические науки — от теории к практике. — 2013. — № 27 (1). — С. 139–145.
14. *Орлов М. Е.* Повышение надежности и энергетической эффективности теплофикационных систем / М. Е. Орлов, П. В. Ротов, В. И. Шарапов // Надежность и безопасность энергетики. — 2012. — № 1 (16). — С. 22–26.
15. *Шарапов В. И.* Проблемы оптимизации работы городских теплофикационных систем / В. И. Шарапов, М. М. Замалеев, П. Е. Чаукин // Надежность и безопасность энергетики. — 2015. — № 1 (28). — С. 76–79.
16. *Лившиц М. Ю.* Повышение мощности и экономичности ТЭЦ с открытой теплофикационной системой / М. Ю. Лившиц, Л. П. Шелудько // Вестник Самарского государственного технического университета. Серия: Технические науки. — 2015. — № 1 (45). — С. 123–130.
17. *Королёв В. И.* Использование тепловых насосов для повышения эффективности работы ПАТЭС при теплоснабжении населенных пунктов / В. И. Королёв, А. Ю. Ластовцев, А. В. Терентьев // Материалы тезисов науч.-техн. конф. проф.-преп. сост., науч. сотр. и курсантов. — СПб.: ГМА им. адм. С. О. Макарова, 2010. — С. 295–298.
18. *Батенин В. М.* Термодинамическая оценка возможности повышения экономичности теплофикационных турбин с использованием теплового насоса, работающего на водяном паре / В. М. Батенин [и др.] // Теплоэнергетика. — 2016. — № 1. — С. 3. DOI: 10.1134/S0040363616010021.

REFERENCES

1. Mikheev, V.L., V.I. Korolev, and A.Yu. Lastovtsev. "Arktika – vazhneishii plot geopolitiki Rossii." *Vestnik Soveta Federatsii* 4 (2010): 42–47.
2. Baryshnikov, S.O., V.I. Korolev, and A.Yu. Lastovtsev. "Podgotovka kadrov dlya plavuchikh ob'ektov s yadernoi ustanovkoi v GUMRF imeni admirala S.O. Makarova." *Atomnyi projekt* 19 (2014): 19–20.
3. Korolev, V.I., V.L. Mikheev, and A.Yu. Lastovtsev. "Uspeshnoe prodvizhenie PATES v Rossii i mire vozmozhno pri izmenenii podkhoda k proektirovaniyu i normativno-pravovoi dokumentatsii." *Materialy tezisov nauch.-tekhn. konf. prof.-prep. sost., nauch. sotr. i kursantov*. SPb.: GMA im. adm. S. O. Makarova, 2011. 348–349.
4. Ivanov, V.A. *Rezhimy moshchnykh paroturbinnnykh ustanovok: monografiya*. L.: Energoatomizdat, 1986.
5. Korolev, V.I., I.I. Kostylev, and A.Yu. Lastovtsev. *Osobennosti formirovaniya i teplovogo rascheta parokondensatnogo tsikla sudov i plavuchikh energoblokov s yadernoi energeticheskoi ustanovkoi*. SPb.: Bell, 2006.
6. Borovkov, V.M., O.I. Demidov, and S.A. Kazarov. *Teplovye skhemy TES i AES*. SPb.: Energoatomizdat, 1995.
7. Volkov, E.P., V.A. Vedyayev, and V.I. Obrezkov. *Energeticheskie ustanovki elektrostantsii: uchebnyk dlya vuzov*. M.: Energoatomizdat, 1983.
8. Elizarov, D.P. *Teplotekhnicheskie ustanovki elektrostantsii*. M.: Energoatomizdat, 1982.
9. Rotov, Pavel. "Comparison of energy efficiency of CHP in quantitative and qualitative regulation of heat load." *Elektricheskie stantsii* 10(1011) (2015): 19–23.
10. Sharapov, V.I. "Ob odnoi iz vozmozhnostei povysheniya energeticheskoi effektivnosti teplofikatsionnykh turboustanovok." *Energetik* 8 (2014): 51–53.
11. Korolev, V.I., A.Y. Lastovtsev, and E.I. Gavrillov. "Analysis of the technical solutions affecting intensity of erosion processes in flowing part of the turbine TK-35/38-3,4c." *Ekspluatatsiya morskogo transporta* 3(61) (2010): 47–52.
12. Nazarov, V., L. Tarasevich, and P. Nazarov. "Analysis for Involvement of TPP Operating in Accordance with Heating Schedule to Passing Through Failures of Electric Load Schedules." *Energetika. Proceedings of CIS higher education institutions and power engineering associations* 5 (2013): 56–64.
13. Shubenko, Alexander, and Olga Babenko. "Rational modes of operate cogeneration turbines with single heated network water." *Tekhnicheskie nauki - ot teorii k praktike* 27-1 (2013): 139–145.
14. Orlov, M.E., P.V. Rotov, and V.I. Sharapov. "Povyshenie nadezhnosti i energeticheskoi effektivnosti teplofikatsionnykh system." *Nadezhnost' i bezopasnost' energetiki* 1(16) (2012): 22–26.
15. Sharapov, V.I., M.M. Zamaleev, and P.E. Chaukin. "Problemy optimizatsii raboty gorodskikh teplofikatsionnykh system." *Nadezhnost' i bezopasnost' energetiki* 1(28) (2015): 76–79.
16. Livshits, Mihail Yu., and Leonid P. Sheludko. "Increasing of power and economical. Efficiency for a heat and electricity plant with the open district heating system." *Vestnik of Samara State Technical University. Technical Sciences Series* 1(45) (2015): 123–130.
17. Korolev, V.I., A.Yu. Lastovtsev, and A.V. Terent'ev. "Ispol'zovanie teplovykh nasosov dlya povysheniya effektivnosti raboty PATES pri teplosnabzhenii naseleennykh punktov." *Materialy tezisov nauch.-tekhn. konf. prof.-prep. sost., nauch. sotr. i kursantov*. SPb.: GMA im. adm. S. O. Makarova, 2010. 295–298.
18. Batenin, V.M., V.V. Datsenko, Y.A. Zeigarnik, A.S. Kosoi, and M.V. Sinkevich. "Thermodynamic evaluation of the possibility to increase cogeneration turbine efficiency by using a heat pump operating with steam." *Thermal Engineering* 63.1 (2016): 1–6.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Королёв Владимир Ильич —
 кандидат технических наук, профессор
 ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала
 С.О. Макарова
 198035, Российская Федерация, Санкт-Петербург,
 ул. Двинская, 5/7
 e-mail: vlikor2007@yandex.ru, kaf_snef@gumrf.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Korolev, Vladimir I. —
 PhD, professor
 Admiral Makarov State University of Maritime
 and Inland Shipping
 5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg 198035,
 Russian Federation
 e-mail: vlikor2007@yandex.ru, kaf_snef@gumrf.ru

Статья поступила в редакцию 13 сентября 2018 г.
 Received: September 13, 2018.

THE INFLUENCE OF THE WEAR OF DIESEL'S CYLINDER GROUP ON THE TEMPERATURE STATE OF PISTON

V. A. Zhukov, O. V. Melnik, L. V. Tuzov

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

Forcing of ship internal combustion engines at the average effective pressure is accompanied by an increase in the maximum cycle pressure, an increase in the thermal stress of the cylinder-piston group parts and an intensification of their wear. Wear of parts of the cylinder group leads to an increase in the gap between the piston and the cylinder mirror. The consequence of increasing the gap is a decrease in heat transfer from the piston to the cylinder walls and an increase in the breakthrough of gases having a high temperature from the combustion chamber to the gap. A critical increase in the temperature of the piston can lead to its destruction and engine failure. The most typical types of piston failure are presented in the article. The aim of the research was to assess the influence of these two factors on the temperature condition of the piston. Calculation of heat transfer processes in the annular channel, performed using differential equations of energy and continuity, as well as the criterion equations of fluid flow in flat channels allowed to determine the temperature of the gases and the lateral surface of the piston at different values of the gap between the piston and the cylinder sleeve and different gas flow rates in the gap. The calculation was performed for the engine CHN 18/20, having a piston made of aluminum alloy. It was found that the increase in the number of gases entering the gap from the combustion chamber has a more significant effect on the temperature condition of the piston compared to the gap, increasing due to wear of the engine cylinder group parts. It is concluded that the number of gases with high temperature entering the gap leads to a significant increase in the temperature of the piston. The increase in the temperature of the piston due to wear of the parts of the cylinder group must be taken into account when determining its heat-stressed state. To ensure the permissible temperature level of the piston during operation, it is necessary to develop design and technological measures aimed at reducing the flow of gases through the gap between the piston and the cylinder mirror.

Keywords: marine internal combustion engines, parts of cylinder and piston, wear, gas breakthrough, heat transfer in flat channels, the temperature condition of the piston, the reliability of marine diesel engines.

For citation:

Zhukov, Vladimir A., Olesya V. Melnik, and Leonid V. Tuzov. "The influence of the wear of diesel's cylinder group on the temperature state of piston." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova* 10.5 (2018): 1040–1052. DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-5-1040-1052.

УДК 621.436

ВЛИЯНИЕ ИЗНОСА ДЕТАЛЕЙ ЦИЛИНДРОПОРШНЕВОЙ ГРУППЫ ДИЗЕЛЯ НА ТЕМПЕРАТУРНОЕ СОСТОЯНИЕ ПОРШНЯ

В. А. Жуков, О. В. Мельник, Л. В. Тузов

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

Форсирование судовых двигателей внутреннего сгорания по среднему эффективному давлению сопровождается ростом максимального давления цикла, повышением теплонапряженности деталей цилиндропоршневой группы и интенсификацией их изнашивания. Износ деталей цилиндропоршневой группы приводит к увеличению зазора между поршнем и зеркалом цилиндра. Следствием увеличения зазора являются снижение теплоотвода от поршня к стенкам цилиндра и возрастание прорыва газов, имеющих высокую температуру, из камеры сгорания в зазор. Критическое повышение температуры поршня может привести к его разрушению и выходу двигателя из строя. В статье представлены наиболее характерные виды разрушений поршня. Целью проведенных исследований являлась оценка влияния двух указанных факторов на температурное состояние поршня. Расчет процессов теплообмена в кольцевом канале, выполненный с использованием дифференциальных уравнений энергии и неразрывности, а также критериальных уравне-

ний течения жидкости в плоских каналах, позволил определить температуру газов и боковой поверхности поршня при различных значениях зазора между поршнем и цилиндровой втулкой и различных расходах газа в зазоре. Расчет выполнялся для двигателя ЧН 18/20, имеющего поршень, изготовленный из алюминиевого сплава. Было установлено, что увеличение количества газов, поступающих в зазор из камеры сгорания, оказывает более существенное влияние на температурное состояние поршня по сравнению с величиной зазора, возрастающего вследствие износа деталей цилиндропоршневой группы двигателя. Сделан вывод о том, что именно количество газов с высокой температурой, поступающих в зазор, приводит к существенному повышению температуры поршня. Повышение температуры поршня вследствие износа деталей цилиндропоршневой группы необходимо учитывать при определении его теплонапряженного состояния. Для обеспечения допустимого температурного уровня поршня в процессе эксплуатации необходимо разрабатывать конструкторские и технологические мероприятия, направленные на снижение расхода газов через зазор между поршнем и зеркалом цилиндра.

Ключевые слова: судовые двигатели внутреннего сгорания, детали цилиндропоршневой группы, износ, прорыв газов, теплообмен в плоских каналах, температурное состояние поршня, надежность судовых дизелей.

Для цитирования:

Жуков В. А. Влияние износа деталей цилиндропоршневой группы дизеля на температурное состояние поршня / В. А. Жуков, О. В. Мельник, Л. В. Тузов // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2018. — Т. 10. — № 5. — С. 1040–1052. DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-5-1040-1052.

Введение (Introduction)

Основной тенденцией развития судовых дизелей на протяжении нескольких последних десятилетий является их форсирование по среднему эффективному давлению и частоте вращения коленчатого вала [1]–[3]. Оба фактора обуславливают повышение тепловых и механических нагрузок на детали цилиндропоршневой группы (ЦПГ). В наиболее тяжелых условиях работают цилиндрические втулки, поршни и поршневые кольца форсированных двигателей. Рабочая температура цилиндрических втулок в зоне перемещения поршневых колец составляет 150–200 °С, температура кромок камер сгорания — 350 °С, а температура поршней в районе поршневых колец — 200–250 °С для поршней из алюминиевых сплавов и 350–400 °С для чугунных поршней [4], [5]. Превышение допустимых рабочих температур поверхностей поршней и поршневых колец приводит к отказам, связанным с разрушением масляной пленки и нарушением условий смазывания в паре «поршень – гильза цилиндра», приводящим к задирам поршня и зеркала цилиндра (рис. 1), механическим разрушениям поршня вследствие перегрева днища (рис. 2), жарового пояса и поршневых колец (рис. 3), а также камеры сгорания (рис. 4) — [6].

а)



б)



Рис. 1. Следы задиров на юбке поршня (а) и зеркале (б) цилиндра



Рис. 2. Расплавленная головка поршня дизельного двигателя

а)



б)



Рис. 3. Оплавленные участки на жаровом поясе поршня (а) и поршневых кольцах (б) дизельного двигателя

а)



б)



Рис. 4. Трещины на кромке камеры сгорания: а — общий вид; б — увеличенный фрагмент

По имеющимся статистическим данным, собранным в течение длительного периода времени, надежность деталей ЦПГ определяет безотказность двигателя в целом. Доля отказов двигателей различного назначения, связанных с выходом из строя деталей ЦПГ, составляет 30–45 % общего количества отказов [7]–[9]. Проблема обеспечения необходимого уровня надежности деталей ЦПГ требует проведения анализа их напряженно-деформированного состояния с использованием методов математического моделирования [10]–[13], а также экспериментальных исследований условий работы деталей ЦПГ [14]–[16]. На основании исследований совершенствуются конструкция поршней [17]–[19] и технология их изготовления [20], [21], разрабатываются и внедряются новые материалы [22], [23]. Анализ литературных источников позволяет сделать вывод о том, что конструкторские и технологические мероприятия направлены на обеспечение допустимого температурного состояния деталей поршневой группы, что является обязательным условием надежной работы двигателя. Одним из факторов, определяющих температурное и теплонапряженное состояние поршня, является интенсивность отвода теплоты от него в процессе эксплуатации.

Методы и материалы (Methods and Materials)

Известно, что теплота, воспринимаемая днищем поршня при осуществлении рабочего цикла, передается к цилиндрической втулке и далее к охлаждающей жидкости через поршневые кольца [24], [5]. Износ поршней, поршневых колец и цилиндрических втулок при эксплуатации дизелей приводит к нарушению нормального сопряжения трущихся пар, увеличивает зазор между ними, изменяет условия теплообмена по боковой поверхности поршня до первого компрессионного кольца и увеличивает температуру газов, непосредственно соприкасающихся с компрессионными кольцами. Износ компрессионных колец и поверхностей втулок вызывает также нарушение уплотняющей функции компрессионных колец, при этом будет возрастать количество прорывающихся в картер газов, что, в свою очередь, должно отрицательно сказаться на температурном уровне деталей поршневой группы.

Экспериментальные исследования дизеля ЧН18/20 показали, что при увеличении зазора в результате износа цилиндрической втулки на 0,9 мм температура центра днища поршня повышается на 30–35 °С, а при износе на 1,37 мм — на 140 °С. Безусловно, еще большее влияние на теплонапряженность поршневой группы может оказать аварийное состояние поршневых колец — их залегание (пригар). Эксперименты также показывают, что уровень теплонапряженности поршня значительно изменяется при увеличении зазоров в канавках поршневых колец. В связи с этим возникает вопрос: *что может служить объективным показателем допустимости эксплуатации дизеля без ремонта при значительных износах поверхностей цилиндропоршневой группы.*

Многочисленные исследования дизелей с различной степенью изношенности ЦПГ показали, что даже при предельно допустимом износе их мощность падает всего на 6–14 %, а расход топлива растет на 2–10 %. Критерий допустимости эксплуатации дизеля без ремонта должен учитывать показатели роста теплонапряженности. При оценке теплонапряженности поршневой группы дизелей, находящихся в эксплуатации, целесообразно отдельно оценить влияние износа соприкасающихся деталей и ухудшения уплотняющей способности колец. У дизелей ЧН18/20, широко распространенных на флоте и имеющих средний уровень форсированности, износ боковых поверхностей поршней в процессе эксплуатации сравнительно невелик, однако наблюдается значительный износ втулки цилиндра в зоне остановки первого компрессионного кольца. В процессе эксплуатации это может нарушить уплотнительную способность кольца, вызвать резкое увеличение прорыва газов в картер и, как следствие, повышение уровня теплонапряженности поршневой группы дизеля.

Одновременно ухудшаются и условия теплообмена поршня с втулкой цилиндра. На базе имеющихся источников научной и технической литературы практически невозможно установить причины, оказывающие более сильное влияние на тепловое состояние поршня: увеличение прорыва газов вследствие износа компрессионных колец и втулки цилиндра или ухудшение теплоотвода от поршня из-за увеличения зазора. Для двигателя ЧН18/20 эта проблема особенно актуальна,

так как поршень двигателя изготовлен из алюминиевого сплава, а цилиндровая втулка — из стали. Различные коэффициенты теплового расширения приводят к необходимости увеличенного зазора между деталями ЦПГ. Поршень имеет уплотняющую часть с тремя компрессионными кольцами и короткую юбку. Указанные особенности повышают вероятность прорыва газов из камеры сгорания в зазор между поршнем и цилиндровой втулкой и изменения вследствие этого температурного состояния поршня.

Для выяснения этого важного для практики вопроса необходимо детально изучить изменения условий теплообмена в зазоре между головкой поршня и втулкой цилиндра в зависимости от его величины и качества прорывающихся газов. С этой целью, прежде всего, необходимо определить температуру газов в зазоре. Для определения температуры газов найдем тепловой поток на стенках канала, который можно определить из уравнения баланса энергии для элемента жидкости длиной dx , ограниченного стенками канала и двумя сечениями, нормальными к его оси. Для этого проинтегрируем уравнение энергии по сечению канала.

Уравнение энергии в общем случае имеет вид

$$\rho c_p \frac{dT}{d\tau} = \operatorname{div}(\lambda \operatorname{grad} T) + q_v + \mu S,$$

где ρ — плотность жидкости; c_p — изобарная теплоемкость газа, отнесенная к единице массы; T — температура жидкости; τ — время; λ — коэффициент теплопроводности жидкости; q_v — мощность внутренних источников теплоты; μ — динамический коэффициент вязкости; μS — диссипативная функция.

Преобразуем левую часть этого уравнения с помощью уравнения неразрывности и перейдем от температуры к энтальпии:

$$\frac{\partial(\rho h)}{\partial \tau} + \frac{\partial(\rho \omega_x h)}{\partial x} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}(r \rho \omega_r h) = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \lambda \frac{\partial T}{\partial r} \right) + q_v + \mu S,$$

где ω_x и ω_r — соответственно осевая и радиальная составляющие скорости; h — энтальпия, отнесенная к единице массы.

Введя допущения о стационарности течения и теплообмена и пренебрегая диссипацией и наличием внутренних источников, получим

$$\frac{\partial(\rho \omega_x h)}{\partial x} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}(r \rho \omega_r h) = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \lambda \frac{\partial T}{\partial r} \right).$$

Умножив последнее уравнение на $2\pi r dr$ и выполнив интегрирование от r_1 до r_2 , получим

$$\int_{r_1}^{r_2} \frac{\partial(\rho \omega_x h)}{\partial x} 2\pi r dr + 2\pi \int_{r_1}^{r_2} d(r \rho \omega_r h) = 2\pi \int_{r_1}^{r_2} \frac{d}{dx} \lambda \frac{\partial T}{\partial x} r dr + 2\pi \int_{r_1}^{r_2} d \left(r \lambda \frac{\partial T}{\partial r} \right), \quad (1)$$

где r_1 и r_2 — соответственно внутренний и внешний радиусы канала.

Второй член левой части обращается в нуль, так как $\omega_r = 0$ при $r = r_1$ и $r = r_2$. Преобразуем второй член правой части:

$$2\pi \int_{r_1}^{r_2} d \left(r \lambda \frac{\partial T}{\partial r} \right) = 2\pi \left[r \lambda \frac{\partial T}{\partial r} \right]_{r_1}^{r_2} = \lambda \left(\frac{\partial T}{\partial r} \right)_{r=r_2} 2\pi r_2 - \lambda \left(\frac{\partial T}{\partial r} \right)_{r=r_1} 2\pi r_1.$$

Для осредненного по периметру теплового потока с учетом его направления можно записать

$$\left(\frac{\partial T}{\partial r} \right)_{r=r_2} = - \left(\frac{\partial T}{\partial r} \right)_{r=r_1}.$$

Окончательный вид равенства

$$2\pi \int_{r_1}^{r_2} d \left(r \lambda \frac{\partial T}{\partial r} \right) = 2\pi (r_2 + r_1) \lambda \left(\frac{\partial T}{\partial r} \right)_{r=r_2} = 2\pi (r_2 + r_1) q_c.$$

Изменив последовательность дифференцирования по x и интегрирования по r , получим

$$\frac{d}{dx} \int_{r_1}^{r_2} \rho \omega_x h 2\pi r dr = \frac{d}{dx} \int_{r_1}^{r_2} \lambda \frac{\partial T}{\partial x} 2\pi r dr + q_c 2\pi (r_2 + r_1).$$

Отсюда

$$q_c = \frac{1}{2\pi(r_2 + r_1)} \left[\frac{d}{dx} \int_f \left(\rho \omega_x h - \lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right) df \right].$$

Теплопроводностью вдоль канала можно пренебречь ввиду ее малости, как это традиционно делается при решении инженерных задач. Тогда уравнение для теплового потока примет более простой вид:

$$q_c = \frac{1}{2\pi(r_2 + r_1)} \frac{d}{dx} \int_f \rho \omega_x h df. \quad (2)$$

Это уравнение справедливо при переменных плотности и теплоемкости среды по длине канала. В оценочном расчете переменностью этих величин можно пренебречь. Выполнив преобразования с учетом уравнения (2) и введя среднюю температуру, запишем

$$\bar{T} = \frac{\int_f \omega_x T df}{\int_f \omega_x df}.$$

Уравнение для теплового потока можно представить в следующем виде:

$$q_c = \frac{1}{2\pi(r_2 + r_1)} c_p G \frac{d\bar{T}}{dx}, \quad (3)$$

где G — массовый расход жидкости.

Местный коэффициент теплоотдачи определяется по формуле

$$\alpha = - \frac{\lambda}{T_c - \bar{T}} \left(\frac{dT}{dn} \right)_{n=0}.$$

Следовательно, учитывая уравнение (3), получим

$$\alpha = - \frac{c_p G}{2\pi(r_2 + r_1)(T_c - \bar{T})} \frac{d\bar{T}}{dx}. \quad (4)$$

Запишем уравнение (4) следующим образом:

$$\frac{d\bar{T}}{dx} + \frac{2\pi(r_2 + r_1)\alpha}{Gc_p} \bar{T} = \frac{2\pi(r_2 + r_1)}{Gc_p} T_c,$$

где T_c — температура стенки в данной точке.

Обозначив

$$f(x) = \frac{2\pi(r_2 + r_1)\alpha}{Gc_p} \quad \text{и} \quad g(x) = \frac{2\pi(r_2 + r_1)}{Gc_p} T_c,$$

получим

$$\frac{d\bar{T}}{dx} + f(x)\bar{T} = g(x)T_c,$$

С учетом граничного условия $\bar{T} = T_0$ при $x = 0$ решение этого уравнения имеет вид

$$\bar{T} = e^{-\varphi(x)} \left[T_0 + \int_0^x g(x) e^{\varphi(x)} dx \right],$$

где $\varphi(x) = \int_0^x f(x) dx$.

Если температура стенки постоянна по длине канала ($T_c = \text{const}$), то

$$\bar{T} = e^{-\varphi} \left(T_0 + T_c \int_0^x \varphi e^{\varphi} dx \right) = e^{-\varphi} \left(T_0 + T_c \int_0^{\varphi} e^{\varphi} d\varphi \right),$$

откуда следует, что

$$\bar{T} = T_c + (T_0 - T_c)e^{-\varphi}.$$

Если коэффициент теплоотдачи постоянен, то температура газа определяется по формуле

$$\bar{T} = T_c + (T_0 - T_c)e^{-\frac{2\pi(r_2+r_1)\alpha}{Gc_p}x}. \quad (5)$$

Так как кривизна канала мала, коэффициент теплоотдачи от газов к стенкам, образующим зазор между головкой и втулкой цилиндра, может быть рассчитан по формуле для плоских течений. Приближенная оценка коэффициентов теплообмена при ламинарном и турбулентном течении жидкости в плоских каналах [25]:

$$\bar{Nu} = \left(1 + n \frac{l_H}{x}\right) Nu_\infty; \quad (x \geq l_H),$$

где \bar{Nu} — среднее для всего канала число Нуссельта; l_H — длина гидродинамического, начального участка, определяемая по формуле $l_H = aPr^{2/3} hRe$; Pr , Re — соответственно числа Прандтля и Рейнольдса; x — текущая координата вдоль зазора; a , n — постоянные, определяемые согласно рекомендациям, приведенным в работах [26], [27].

Результаты (Results)

Расход газов, прорывающихся через кольцевое уплотнение, определялся из расчета давлений в кольцевом лабиринте. Как показали расчеты, результаты которых приведены на рис. 5, газ на сравнительно коротком участке приобретает температуру, близкую к температуре стенок. Расстояние, на котором происходит движение температуры газа до безопасной для работы колец, увеличивается с ростом расхода газов или зазора между головкой поршня и втулкой. Полученные данные показывают, что увеличение прорыва газов приводит к повышению температуры газового потока на середине длины кольцевого канала на 30–40 %, а на выходе из зазора температура может превышать безопасные для алюминиевых сплавов значения. Повышенные значения температуры прорывающихся газов приводят также к интенсивному старению моторного масла.

Для определения влияния прорыва газов и величины зазора на температурный уровень поршня необходимо определить условия теплообмена поршня с втулкой цилиндра, учитывающие теплоту, вносимую с газами в зазор, и распределение газов в зазоре. На данном этапе трудно достаточно точно описать теплообмен в зазоре между головкой поршня и втулкой цилиндра, так как протечки газа носят нестабильный характер. Течение газа в зазоре происходит не по всему периметру одновременно, а имеет вид прорывов в различных местах уплотнения. Наличие масла в зазоре, в свою очередь, усложняет задачу. Экспериментальный материал, связанный с определением характера изменения температуры газов в зазоре и теплообмена в нем, практически отсутствует. В связи с этим представляется целесообразным разработать приближенную методику, основанную на осредненных параметрах.

Движущуюся в зазоре среду будем рассматривать как поток с внутренними источниками теплоты, мощность которых определяется из выражения

$$q_v = \frac{c_p G \Delta T_r}{\pi D \Delta x h},$$

где ΔT_r — разность температур газа на входе в участок Δx и выходе из него, которые определяются по формуле (5); h — радиальный зазор (ширина канала); D — диаметр цилиндра.

Считая процесс стационарным и одномерным, уравнение энергии запишем в следующем виде:

$$\frac{d^2 T}{dy^2} = \frac{q_v}{\lambda},$$

где λ — коэффициент теплопроводности среды; y — координата в радиальном направлении.

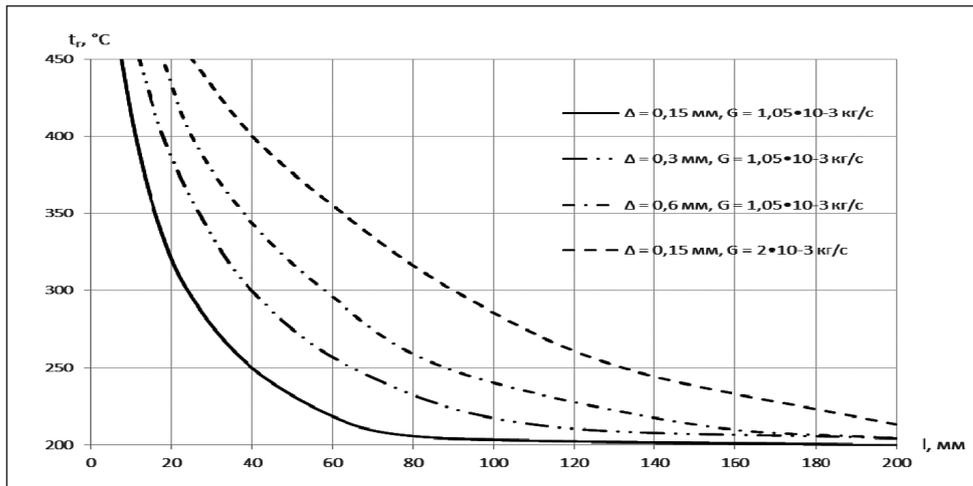


Рис. 5. Изменение температуры газа в зазоре между головкой поршня и втулкой цилиндра:
 t_r — средняя температура газового потока в кольцевом канале, °C;
 l — расстояние от огневого днища крышки цилиндра, мм

Решив это уравнение с граничными условиями первого рода $T = T_{ц}$ при $y = 0$ и $T = T_{п}$ при $y = h$, где $T_{ц}$ — температура цилиндра; $T_{п}$ — температура поршня, получим распределение температуры в потоке:

$$T = T_{ц} + (T_{п} + T_{ц})\eta - \frac{q_v h^2}{2\lambda} \eta(1 - \eta),$$

где $\eta = \frac{y}{h}$.

Отсюда получим тепловой поток через боковую поверхность поршня:

$$q_{п} = \frac{\lambda}{h} (T_{п} - T'_{ц}),$$

где

$$T'_{ц} = T_{ц} + \frac{c_p G \Delta T_3 h}{2\pi D \Delta x \lambda}.$$

Такой подход позволяет учесть влияние прорыва на условия теплообмена головки поршня с втулкой цилиндра заданием $T_{ц}$, учитывающей теплоту, вносимую газами в зазор, вместо средней температуры втулки. Эта методика использовалась для определения граничных условий теплообмена по боковой поверхности головки поршня при расчете температурных полей поршня дизеля 12ЧН18/20. Теплопередача через поршневые кольца определялась по разработанной ранее программе, учитывающей изменение толщины масляной пленки между кольцом и втулкой цилиндра и осевое перемещение колец в канавках под действием сил трения, инерции и давления газов.

Расчет температурных полей поршня при различных уплотняющих способностях колец и зазорах между головкой поршня и втулкой цилиндра проводился в осесимметричной постановке. Результаты расчета температурных полей поршня дизеля 12ЧН18/20 при различной величине зазоров между головкой поршня и втулкой цилиндра и уплотняющей способности колец приведен на рис. 6. Результаты расчета показывают, что увеличение зазора между поршнем и зеркалом цилиндра, так же, как и рост прорыва газов в картер, приводит к значительному повышению температуры поршня. При увеличении прорыва газов в два раза по сравнению со значениями, характерными для зазоров, предусмотренных нормальным состоянием деталей ЦПГ, температура днища цилиндра превышает значения, допустимые для алюминиевых сплавов. Это может явиться причиной разрушения поршня и выхода двигателя из строя.

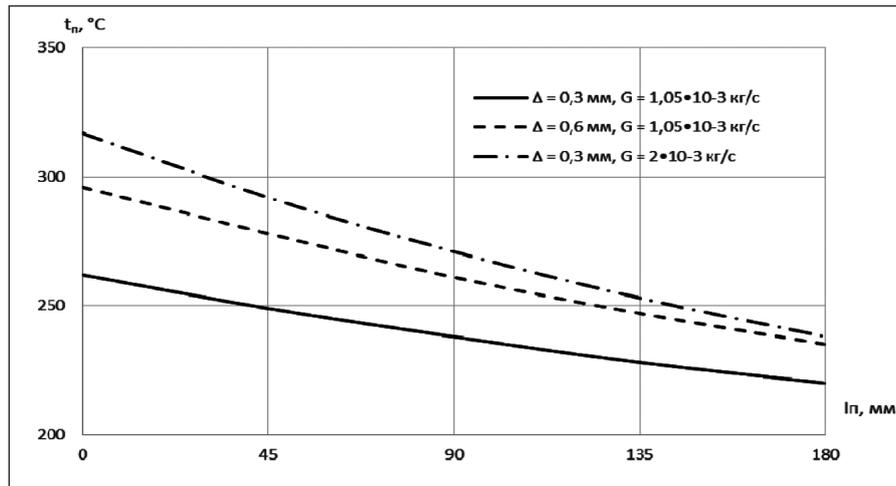


Рис. 6. Изменение температуры поршня в зависимости от величины зазора и прорыва газов в картер:

t_p — температура боковой поверхности поршня, °C; l_p — расстояние от днища поршня, мм

Обсуждение (Discussion)

Результаты проведенных расчетных исследований показали, что при увеличении зазора между поршнем и цилиндровой втулкой, вследствие износа деталей ЦПГ, наблюдается изменение температурного состояния поршня. При этом увеличение количества прорывающихся в зазор газов оказывает более сильное влияние на температурный уровень поршня по сравнению с ростом величины зазора. Фактор повышения температуры в зазоре необходимо учитывать при оценке теплонапряженного состояния поршня в процессе эксплуатации и формирования интегральных показателей теплонапряженности, таких, например, как предложенные в работе [28]. Превышение допустимого температурного уровня поршня может привести к снижению его прочности и разрушению (см. рис. 2–4).

Следует отметить, что увеличение зазора между головкой поршня и втулкой цилиндра менее опасно, чем увеличение прорыва газов, так как с увеличением зазоров темп роста температуры поршня замедляется за счет влияния соответствующего теплового расширения поршня. Этот процесс может стабилизироваться на безопасном для работы двигателя уровне. Увеличение прорыва газов может привести в результате теплового расширения поршня к полному исчезновению зазора, разрушению масляной пленки, задиру поршня и цилиндровой втулки, и, как следствие, к выходу двигателя из строя.

Предотвращение или минимизация прорыва газов из камеры сгорания в зазор между поршнем и цилиндровой втулкой позволит обеспечить сохранение допустимого температурного уровня поршня, снизить вероятность появления отказов судовых дизелей, что будет способствовать повышению их надежности.

Выводы (Summary)

Проведенные исследования позволяют сделать следующие выводы.

1. Форсирование дизелей по среднему эффективному давлению и увеличение максимального давления цикла увеличивает вероятность прорыва газов в зазор между поршнем и цилиндровой втулкой при износе деталей ЦПГ в процессе эксплуатации.
2. Наиболее актуальной эта проблема является для двигателей, поршни которых изготовлены из алюминиевых сплавов с высокими коэффициентами теплового расширения.
3. Увеличение количества прорывающихся в зазор газов при износе деталей ЦПГ оказывает на температурное состояние поршня более существенное влияние, чем уменьшение теплоотвода от него вследствие увеличения зазора.

4. Фактор повышения температуры газов в зазоре необходимо учитывать при оценке теплонапряженного состояния поршней дизелей, находящихся в эксплуатации, и формировании интегральных показателей теплонапряженности.

5. Необходимо продолжение исследований, направленных на разработку конструкторских и технологических мероприятий, обеспечивающих высокую герметичность камеры сгорания, износостойкость деталей ЦДГ и их защиту от потенциально опасных повышений температурного уровня, приводящих к отказам дизелей.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Конкс Г. А.* Мировое судовое дизелестроение. Концепция конструирования, анализ международного опыта / Г. А. Конкс, В. А. Лашко. — М.: Машиностроение, 2005. — 512 с.

2. *Сорокин В. А.* Техничко-эксплуатационные характеристики отечественных и зарубежных судовых дизелей мощностью до 3 МВт / В. А. Сорокин, М. Ю. Иванов // Наука и транспорт. — 2013. — № 1 (5). — С. 70–77.

3. *Безюков О. К.* Состояние и перспективы судового двигателестроения в России / О. К. Безюков, В. А. Жуков // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Морская техника и технология. — 2017. — № 2. — С. 40–53. DOI: 10.24143/2073-1574-2017-2-40-53.

4. *Чайнов Н. Д.* Конструирование двигателей внутреннего сгорания / Н. Д. Чайнов [и др.]. — М.: Машиностроение, 2008. — 496 с.

5. *Кавтарадзе Р. З.* Локальный теплообмен в поршневых двигателях / Р. З. Кавтарадзе. — М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2007. — 472 с.

6. MAHLE Aftermarket [Электронный ресурс]. — Режим доступа: www.mahle-aftermarket.com (дата обращения: 30.08.2018).

7. *Гурвич И. Б.* Износ и долговечность двигателей / И. Б. Гурвич. — Горький: Волго-Вятское книжное издательство, 1979. — 175 с.

8. *Григорьев М. А.* Износ и долговечность автомобильных двигателей / М. А. Григорьев, Н. Н. Пономарев. — М.: Машиностроение, 1976. — 248 с.

9. *Григорьев М. А.* Обеспечение надежности двигателей / М. А. Григорьев, В. А. Долецкий. — М.: Машиностроение, 1990. — 322 с.

10. *Чайнов Н. Д.* Обобщенная модель анализа теплового и напряженно-деформированного состояния деталей цилиндра-поршневой группы / Н. Д. Чайнов, Л. Л. Мягков // Сборник научных трудов «Авиационно-космическая техника и технология». — 2001. — Вып. 26: Двигатели и энергоустановки. — С. 4–8.

11. *Белогуб А. В.* Геометрические и силовые граничные условия при анализе напряженно-деформированного состояния поршней методом конечных элементов / А. В. Белогуб, М. А. Зотов, М. А. Максимова // Двигатели внутреннего сгорания. — 2013. — № 2. — С. 70–75.

12. *McClure F.* Numerical modeling of piston secondary motion and skirt lubrication in internal lubrication engines: Requirements for Degree of Doctor of Philosophy in Mechanical Engineering / F. McClure. — Massachusetts Institute of Technology, 2007. — 241 p.

13. *Левтеров А. М.* Трехмерная конечноэлементная модель анализа нестационарных термоупругих напряжений поршня быстроходного дизеля / А. М. Левтеров, А. Н. Авраменко // Двигатели внутреннего сгорания. — 2008. — № 2. — С. 49–55.

14. *Леванов Г. И.* Экспериментальные исследования трибосопряжения «поршневое кольцо-цилиндр» / Г. И. Леванов, И. В. Мухортов // Двигатели внутреннего сгорания. — 2012. — № 2. — С. 64–66.

15. *Madden D.* Part 1: Piston friction and Noise study of three different piston architectures for an automotive gasoline engine / D. Madden, K. Kim, M. Takiguchi. — SAE Technical Paper, 2006. — 9 p. — № 2006-01-0427. DOI: 10.4271/2006-01-0427.

16. *Kwang-soo K.* Part 2: The Effects of Lubricating Oil Film Thickness Distribution on Gasoline Engine Piston Friction / K.S. Kim, T. Godward, M. Takiguchi, S. Aoki. — SAE Technical Paper, 2007. — 9 p. — № 2007-01-1247. DOI: 10.4271/2007-01-1247.

17. *Таран С. Б.* Модульное конструкторско-технологическое проектирование чугуновых поршней высокофорсированных дизельных ДВС / С. Б. Таран [и др.] // Двигатели внутреннего сгорания. — 2012. — № 2. — С. 102–105.

18. Пылев В. А. Автоматизированное проектирование поршней быстроходных дизелей с заданным уровнем длительной прочности / В. А. Пылев. — Харьков: Изд-во НТУ «ХПИ», 2001. — 332 с.
19. Рождественский Ю. В. Радиальное профилирование направляющей части поршня двигателя внутреннего сгорания / Ю. В. Рождественский, А. И. Гусев // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Машиностроение. — 2006. — № 11 (66). — С. 78–84.
20. Белогуб А. В. Учет технологических факторов, влияющих на точность получения внешней поверхности юбки поршня и оценка возможности снижения брака на производстве / А. В. Белогуб, А. С. Стрибуль, Н. Л. Сапич // Двигатели внутреннего сгорания. — 2005. — № 2. — С. 111–114.
21. Алехин В. И. Анализ влияния технологических дефектов на прочность литых тонкостенных поршней ДВС / В. И. Алехин, А. В. Белогуб, О. В. Акимов // Двигатели внутреннего сгорания. — 2012. — № 1. — С. 96–98.
22. Жуков А. А. Методика оценки эксплуатационных свойств материалов поршней ДВС / А. А. Жуков, В. А. Жуков, М. А. Тарасов // Сборник научных трудов «Авиационно-космическая техника и технология». — 2001. — Вып. 26. — С. 103–104.
23. Шпаковский В. В. Продление ресурса двигателя внутреннего сгорания установкой поршня с корундовым слоем / В. В. Шпаковский // Двигатели внутреннего сгорания. — 2014. — № 1. — С. 123–126.
24. Костин А. К. Теплонапряженность двигателей внутреннего сгорания: справ. пособие / А. К. Костин, В. В. Ларионов, Л. И. Михайлов. — Л.: Машиностроение, 1979. — 224 с.
25. Овсянников М. К. Тепловая напряжённость судовых дизелей / М. К. Овсянников, Г. А. Давыдов. — Л.: Судостроение, 1975. — 258 с.
26. Гаврилов Ю. А. Приближенная оценка коэффициента теплообмена при ламинарном и турбулентном течении жидкости в плоских каналах / Ю. А. Гаврилов, Г. Н. Дульнев // Инженерно-физический журнал. — 1972. — Т. 23. — № 4. — С. 612–617.
27. Халатов А. А. Теплообмен и гидродинамика ускоренного потока в плоских криволинейных каналах / А. А. Халатов, А. С. Коваленко. — Киев: Наук. думка, 2006. — 224 с.
28. Лепский А. Г. Анализ возможности формирования интегрального показателя для оценки теплонапряженности деталей судового двигателя / А. Г. Лепский, А. А. Дамаскин // Вестник Мурманского государственного технического университета. — 2008. — Т. 11. — № 3. — С. 451–457.

REFERENCES

1. Konks, G. A., and V. A. Lashko. *Mirovye sudovye dizelestroenie. Kontsepsiya konstruirovaniya, analiz mezhdunarodnogo opyta*. M.: Mashinostroenie, 2005.
2. Sorokin, V. A., and M. Yu. Ivanov. “Tekhniko-ekspluatatsionnye kharakteristiki otechestvennykh i zarubezhnykh sudovykh dizelei moshchnost’yu do 3 MVt.” *Nauka i transport* 1(5) (2013): 70–77.
3. Bezjukov, Oleg Konstantinovich, and Vladimir Anatoljevich Zhukov. “State and prospects of ship engine-building in Russia.” *Vestnik of Astrakhan State Technical University. Series: Marine Engineering and Technologies* 2 (2017): 40–53. DOI: 10.24143/2073-1574-2017-2-40-53
4. Chainov, N. D., N. A. Ivashchenko, A. N. Krasnokutskii, and L. L. Myagkov. *Konstruirovaniye dvigatelei vnutrennego sgoraniya*. M.: Mashinostroenie, 2008.
5. Kavtaradze, R. Z. *Lokal’nyi teploobmen v porshnevnykh dvigatelyakh*. M.: Izd-vo MGTU im. N.E. Bauman, 2007.
6. MAHLE Aftermarket. Web. 30 Aug. 2018 <www.mahle-aftermarket.com>.
7. Gurvich, I. B. *Iznos i dolgovechnost’ dvigatelei*. Gor’kii: Volgo-Vyatskoe knizhnoe izdatel’stvo, 1979.
8. Grigor’ev, M. A., and N. N. Ponomarev. *Iznos i dolgovechnost’ avtomobil’nykh dvigatelei*. M.: Mashinostroenie, 1976.
9. Grigor’ev, M. A., and V. A. Doletskii. *Obespechenie nadezhnosti dvigatelei*. M.: Mashinostroenie, 1990.
10. Chainov, N. D., and L. L. Myagkov. “Obobshchennaya model’ analiza teplovogo i napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya detalei tsilindro-porshnevoi gruppy.” *Aviatsinno-kosmicheskaya tekhnika i tekhnologiya: Sb. nauchn. tr. Vyp. 26. Dvigateli i energoustanovki*. Khar’kov: KhAI, 2001. 4–8.

11. Belogub, A. V., A. A. Zotov, and M. A. Maksimova. "Geometrical and power boundary conditions at analysis of the tense-deformed state of pistons by the method of finite elements." *Dvigateli vnutrennego sgoraniya 2* (2013): 70–75.
12. McClure, F. Numerical modeling of piston secondary motion and skirt lubrication in internal lubrication engines: Requirements for Degree of Doctor of Philosophy in Mechanical Engineering. Massachusetts Institute of Technology, 2007.
13. Levterov, A.M., and A.N. Avramenko. "Trekhnernaya konechnoelementnaya model' analiza nestatsionarnykh termouprugikh napryazhenii porshnya bystrokhodnogo dizelya." *Dvigateli vnutrennego sgoraniya 2* (2008): 49–55.
14. Levanov, I.G., and I.V. Muhotrov. "Experimental investigations of friction unit "piston ring-cylinder"." *Dvigateli vnutrennego sgoraniya 2* (2012): 64–66.
15. Madden, Dermot, Kwangsoo Kim, and Masaaki Takiguchi. *Part 1: Piston friction and Noise study of three different piston architectures for an automotive gasoline engine*. No. 2006-01-0427. SAE Technical Paper, 2006. DOI: 10.4271/2006-01-0427
16. Kim, Kwang-soo, T. Godward, M. Takiguchi, and S. Aoki. *Part 2: The effects of lubricating oil film thickness distribution on gasoline engine piston friction*. No. 2007-01-1247. SAE Technical Paper, 2007. DOI: 10.4271/2007-01-1247
17. Taran, S.B., A.P. Marchenko, B.P. Taran, and O.V. Akimov. "Modular design and process design of cast-iron piston of highly accelerated diesel engines." *Dvigateli vnutrennego sgoraniya 2* (2012): 102–105.
18. Pylev, V.A. *Avtomatizirovannoe proektirovanie porshnei bystrokhodnykh dizelei s zadannym urovnem dlitel'noi prochnosti*. Khar'kov: NTU «KhPI», 2001.
19. Rozhdestvenskii, Yu.V., and A.I. Gusev. "Radial'noe profilirovanie napravlyayushchei chasti porshnya dvigatelya vnutrennego sgoraniya." *Vestnik Yuzhno-Ural'skogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Mashinostroenie* 11(66) (2006): 78–84.
20. Belogub, A.V., A.S. Stribul', and N.L. Sapich. "Uchet tekhnologicheskikh faktorov, vliyayushchikh na tochnost' polucheniya vneshnei poverkhnosti yubki porshnya i otsenka vozmozhnosti snizheniya braka na proizvodstve." *Dvigateli vnutrennego sgoraniya 2* (2005): 111–114.
21. Alyokhin, V.I., A.V. Belogub, and O.V. Akimov. "Analysis of the impact of technological defects on the strength of the cast piston of ice." *Dvigateli vnutrennego sgoraniya 1* (2012): 96–98.
22. Zhukov, A.A., V.A. Zhukov, and M.A. Tarasov. "Metodika otsenki ekspluatatsionnykh svoystv materialov porshnei DVS." *Aviatsinno-kosmicheskaya tekhnika i tekhnologiya: Sb. nauchn. tr. Vyp. 26. Dvigateli i energoustanovki*. Khar'kov: KhAI (2001): 103–104.
23. Shpakovskyy, V.V. "Prolongation of the resource of the internal combustion engine by installation of pistons with corundum layer." *Dvigateli vnutrennego sgoraniya 1* (2014): 123–126.
24. Kostin, A.K., V.V. Larionov, and L.I. Mikhailov. *Teplonapryazhennost' dvigatelei vnutrennego sgoraniya. Spravochnoe posobie*. L.: Mashinostroenie, 1979.
25. Ovsyannikov, M.K., and G.A. Davydov. *Teplovaya napryazhennost' sudovykh dizelei*. L.: Sudostroenie, 1975.
26. Gavrilov, Yu.A., and G.N. Dul'nev. "Priblizhennaya otsenka koeffitsienta teploobmena pri laminarnom i turbulentnom techenii zhidkosti v ploskikh kanalakh." *Inzhenerno-fizicheskii zhurnal* 23.4 (1972): 612–617.
27. Khalatov, A.A., and A.S. Kovalenko. *Teploobmen i gidrodinamika uskorennogo potoka v ploskikh krivo-lineinykh kanalakh*. Kiev: Nauk, dumka, 2006.
28. Lepsky, A.G., and A.A. Damaskin. "Analysis of integral criterion formation for thermal load estimation of marine internal combustion engine components." *Vestnik of MSTU* 11.3 (2008): 451–457.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Жуков Владимир Анатольевич —
 доктор технических наук, доцент
 ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала
 С. О. Макарова»
 198035, Российская Федерация, г. Санкт-Петербург,
 ул. Двинская, 5/7
 e-mail: va_zhukov@rambler.ru,
zhukovva@gumrf.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

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

Тузов Леонид Васильевич —
доктор технических наук, профессор
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала
С. О. Макарова»
198035, Российская Федерация, г. Санкт-Петербург,
ул. Двинская, 5/7
e-mail: kaf_sdvs@gumrf.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

Tuzov, Leonid 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_sdvs@gumrf.ru

*Статья поступила в редакцию 17 сентября 2018 г.
Received: September 17, 2018.*

DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-5-1053-1062

RESEARCH ELECTRICAL POWER SYSTEMS OF UNDERWATER COMPRESSOR STATION

I. V. Sorokin

Krylov State Research Centre, St. Petersburg, Russian Federation

The article contains an analysis of the two main options for the creation of electrical power systems of underwater compressor station with extended transmission line. The object of study is underwater compressor station capacity of 6 MW with high speed (13 000 rpm) centrifugal compressor. Electric drive contains synchronous electric machine and power converter.

The main objective of the article are to determine the feasibility of using electrical power systems with power converters for AC and DC transmission line variants. According to the results of research, the use of power converters is advisable in electrical power systems of underwater compressor station with DC transmission line due to high energy efficiency and low intensity of power loss growth with increasing cable length. Converter in this case consist of twelve-pulse rectifier on the shore and multi - level voltage source inverter, the number of levels, which depends on the power and voltage transmission. In system with AC transmission line total power consumed from network is increased by 1MVA and the loss of active power loss by 3.6%. At approximately equal voltage quality at the input of system, quality of the load voltage for the system with DC transmission line is significantly higher, which allows to reduce the dimensions of filtering devices. The main drawback of the DC line system is the high voltage levels of the inverter output voltage reducing reliability, complicating the structure of the inverter and requiring the use of high-voltage motors.

Keywords: power converter, underwater compressor station, DC transmission line, electric drive, electrical power system, voltage levels, multi-level inverter, twelve-pulse rectifier, high-voltage system, reliability.

For citation:

Sorokin, Iliya V. "Research electrical power systems of underwater compressor station." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova* 10.5 (2018): 1053–1062. DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-5-1053-1062.

УДК 629.12.066.004.2

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМ ПОДВОДНОЙ КОМПРЕССОРНОЙ СТАНЦИИ

И. В. Сорокин

ФГУП «Крыловский государственный научный центр»,
Санкт-Петербург, Российская Федерация

Представлен анализ основных концептуальных вариантов построения электроэнергетических систем подводных компрессорных станций с протяженной линией электропередач. Объектом исследования является подводная компрессорная станция активной мощностью 6 МВт с высокоскоростным (13 000 об/мин) центробежным компрессором, находящаяся на расстоянии 35 км от берега. В качестве электропривода компрессора принимается система: преобразователь частоты – электродвигатель.

Основной задачей исследования являлось определение целесообразности использования электроэнергетических систем со статическими преобразователями частоты в двух основных вариантах кабельной линии — постоянного и переменного тока. Анализ показал, что применение статических преобразователей частоты оказывается целесообразным при внедрении их в структуры с линией передачи на постоянном токе благодаря высокой энергоэффективности и низкой интенсивности роста потерь с увеличением длины кабельной линии. Преобразователь в этом случае состоит из двенадцатимпульсной или береговой системы выпрямления и многоуровневого инвертора напряжения, число уровней которого зависит от напряжения в линии передач. В системе с линией на переменном токе полная мощность P , потребляемая из береговой сети, возрастает на 1 МВ·А, а потери активной мощности в системе по отношению к мощности установки — на 3,6 %. При сопоставимом качестве напряжения на входе сети для обеих систем качество напряжения на нагрузке для системы с линией постоянного тока существенно выше, что по-

звolyет снизить габариты выходных фильтров. Главным недостатком системы с линией постоянного тока являются высокие (свыше 6 кВ) уровни выходного напряжения инвертора, усложняющие структуру инвертора, снижающие общую безотказность системы, а также требующие применения высоковольтных электродвигателей.

Ключевые слова: преобразователь частоты, подводная компрессорная станция, линия постоянного тока, электропривод, уровень напряжения, электроэнергетическая система, многоуровневый инвертор, высоковольтная система, надежность, двенадцатипульсный выпрямитель.

Для цитирования:

Сорокин И. В. Исследование электроэнергетических систем подводной компрессорной станции / И. В. Сорокин // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2018. — Т. 10. — № 5. — С. 1053–1062. DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-5-1053-1062.

Введение (Introduction)

Особое значение в технологии добычи углеводородов, в частности для России, имеет тенденция создания подводных добычных комплексов (ПДК) для работы на труднодоступных морских месторождениях. Для эксплуатации ПДК, при отсутствии фонтанирования углеводорода (обеднение месторождения примерно на 30 %), требуется оборудование для создания необходимой разницы пластового и внешнего давления. С этой целью применяются компрессорные установки — агрегаты, основным элементом которых является нагнетатель газа и его привод. По принципу работы эти механизмы бывают поршневыми, центробежными и ротационными. Поршневые механизмы в большинстве своем работают на низких скоростях, а центробежные и ротационные — на средних и высоких скоростях. Наиболее широкое применение нашли центробежные компрессоры, поэтому с целью регулирования подачи путем изменения частоты вращения нагнетателя используются высокоскоростные регулируемые электроприводы, имеющие преимущества перед аналогичными приводами с двигателями внутреннего сгорания по КПД и масса-габаритным параметрам, что является одним из важнейших показателей привода при проектировании ПДК.

Использование электродвигателей для привода ПДК требует значительного повышения частоты питающего напряжения, так как скорость вращения центробежного компрессора достаточно высока (10–15 тыс. об/мин). В этом случае частота питающей сети для двигателя с минимальными числами пар полюсов (один или два) составит, соответственно:

$$f(2) = \frac{2(10^4 - 1,5 \cdot 10^4)}{60} = (333,33 - 500) \text{ Гц};$$

$$f(1) = \frac{(10^4 - 1,5 \cdot 10^4)}{60} = (166,5 - 250) \text{ Гц}.$$

Большое количество богатых арктических месторождений находится в большой удаленности от берега, такие как Штокмановское месторождение (500 км от берега), что влечет за собой создание сверхдлинных подводных кабельных трасс. Поэтому основными проблемами энергообеспечения ПДК является высокая мощность потерь в подводной кабельной линии при питании двигателя токами высоких частот из-за многократного увеличения реактивной составляющей сопротивления кабеля и вытеснения токов к поверхности кабеля с увеличением частоты (*скин-эффект*) и сложность конструкции подводных элементов системы.

Обзор литературы (Literature Review)

В рамках данной тематики проанализирован ряд обзорных статей [1]–[3] по энергообеспечению подводных компрессорных станций с использованием высоковольтных систем постоянного тока (HVDC), а также материалы источника [4], проработаны конкретные варианты проекта подводного компрессора мощностью 70 МВт с длиной кабельной линии 70 км. Рассмотрена структура преобразователя, состоящая из активного выпрямителя и автономного инвертора напряжения.

Рассмотрены особенности систем HVDC (структура полупроводниковых преобразователей, конструкция кабельных линий и уровни напряжений), выводы о целесообразности их применения при увеличении расстояния передачи приведены в [5]–[7], выполнены расчет и рассмотрение высокомоощных систем HVDC и HVAC сверхвысоких напряжений и расстояний [8], однако в указанных работах не выполнен сравнительный анализ данных систем с низкими уровнями напряжения и мощности при небольшой удаленности от берега.

Актуальность проблемы (Relevance of the Problem)

Объем прогнозируемых ресурсов природного газа России оценивается в 176 трлн м³, при этом доля морских месторождений составляет 35,2 %, однако основная масса (около 400) месторождений находится в труднодоступной Арктической зоне, что требует применения подводной технологии добычи. На данный момент применение ПДК является мировым трендом. Основными лидерами в этой области являются зарубежные компании: «Aker Solution» (Норвегия), «FMC Technologies» (США), «MAN» (Германия), «Siemens» (Германия), «ABB» (Финляндия), при этом полностью отсутствуют отечественные разработки. Исключительный размер нефтегазоносных акваторий России (4 млн км²) требует создания уникальных ПДК с учетом сверхвысоких расстояний (более 100 км) и тяжелых условий эксплуатации и обслуживания. Исследование работ по данной тематике позволяет сделать вывод об отсутствии детального анализа и сравнения различных вариантов построения электроэнергетических систем ПДК. Неизученной также остается динамика потерь в системах при росте мощности и длины кабельной линии системы.

Цели и задачи исследования (Aims and Objectives of the Study)

Целями исследования являются: создание вариантов систем HVDC и HVAC, их детальный анализ; создание рекомендаций по применению данных систем с учетом мощности и удаленности объекта; определение целесообразности использования статических преобразователей частоты в электроэнергетических системах ПДК; определение вида возможных структур систем HVDC и HVAC, их преимущества и недостатки.

Методы и материалы (Methods and Materials)

В качестве основного метода исследования выбран метод компьютерного моделирования. Исходные данные являются одинаковыми для линий постоянного и переменного тока.

Исходные данные. В качестве объекта исследования представлен ПДК со следующими техническими характеристиками (рассмотрен в эскизном проекте «Компрессор – ЭП»):

- удаленность от берега — 35 км;
- активная мощность установки — 6 МВт;
- коэффициент мощности нагрузки — 0,8;
- число оборотов компрессора — 13 000 об /мин;
- режим работы — продолжительный (S1).

В данном исследовании предлагаются к рассмотрению два основных варианта построения электроэнергетической системы ПДК: с кабельными линиями постоянного и переменного тока.

Электроэнергетическая система ПДК с линией постоянного тока. Одним из вариантов построения электроснабжения ПДК выступает система с линией электропередачи на постоянном токе (рис. 1). Два диодных выпрямителя совместно с двумя двухобмоточными трансформаторами формируют двенадцатипульсную схему выпрямления, находящуюся на берегу. Кабельные выводы линии подключаются к модулю многоуровневого инвертора (число уровней может меняться в зависимости от элементной базы) через мощный конденсаторный фильтр. Напряжение передачи на постоянном токе (12 кВ) выбрано исходя из максимальных возможностей современной полупроводниковой техники для представленной структуры. В соответствии со структурной схемой и показателями интенсивности отказов составим схему надежности (структура 1) с учетом возможного резервирования (см. рис. 1).

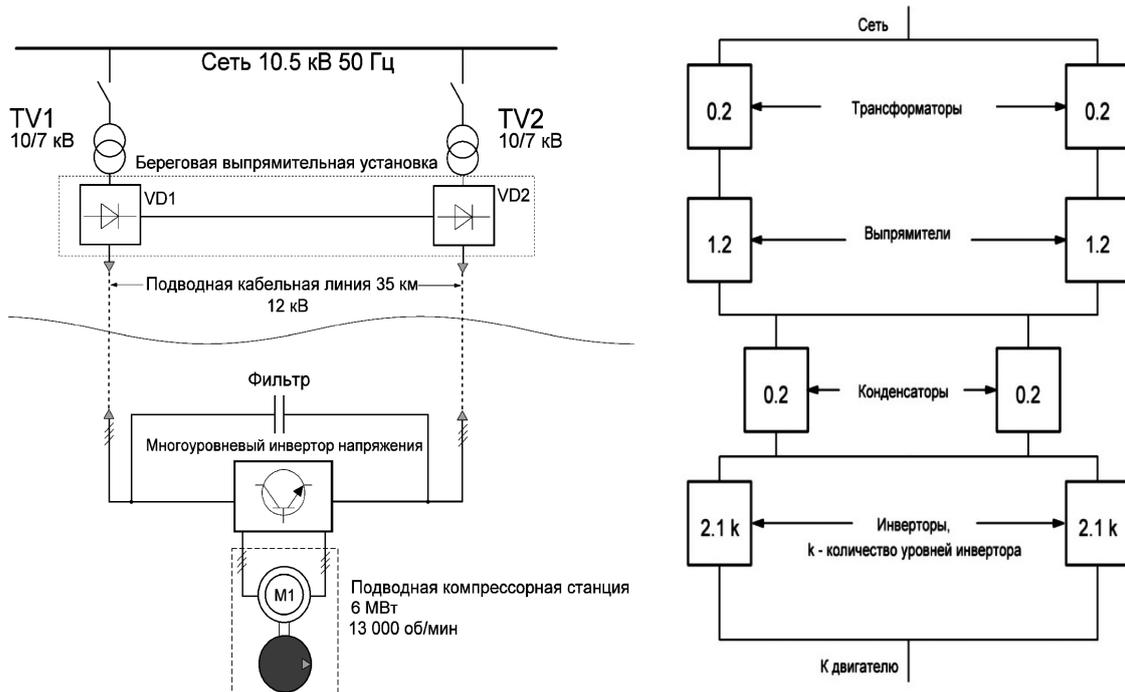


Рис. 1. Структурная схема электроэнергетической системы с электроприводом ПДК и силовой кабельной линией постоянного тока и ее схема надежности (структура 1)

Электроэнергетическая система ПДК с линией переменного тока. Альтернативная схема построения электроэнергетической системы ПДК (структура 2) представлена на рис. 2. Питание электродвигателя ПДК осуществляется от двух независимых преобразователей частоты, расположенных под водой вместе с согласующими трансформаторами $T3$ и $T4$. Надводные повышающие трансформаторы позволяют организовать высоковольтную (35 кВ) линию электропередачи переменного тока частотой 50 Гц. Структура преобразователя частоты — шестипульсный выпрямитель с двухуровневым автономным инвертором напряжения.

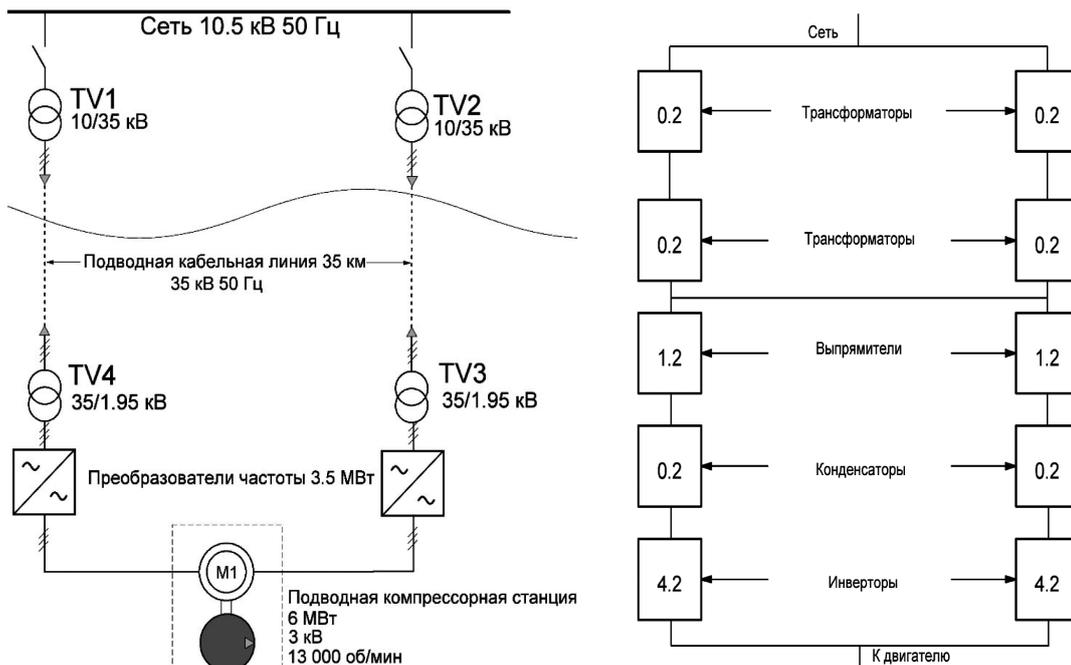


Рис. 2. Структурная схема электроэнергетической системы с электроприводом ПДК и силовой кабельной линией переменного тока и ее схема надежности (структура 2)

Результаты (Results)

Результаты моделирования представлены в виде графиков полной мощности, потребляемой из сети, коэффициента нелинейных искажений на входе / выходе системы и таблицы изменения величины потерь в зависимости от длины кабельной линии для обоих вариантов.

Моделирование структуры 1. На рис. 3 из графика переходного процесса по мощности, потребляемой из сети, видно, что пиковые значения мощности приходятся на включение установки и составляют около 11,8 МВ·А, а установившееся (нормальное) значение потребляемой мощности системы — около 6,7 МВ·А. Значения коэффициентов нелинейных искажений кривой напряжения на входе / выходе системы 8,6 % и 6 % соответственно (рис. 4).

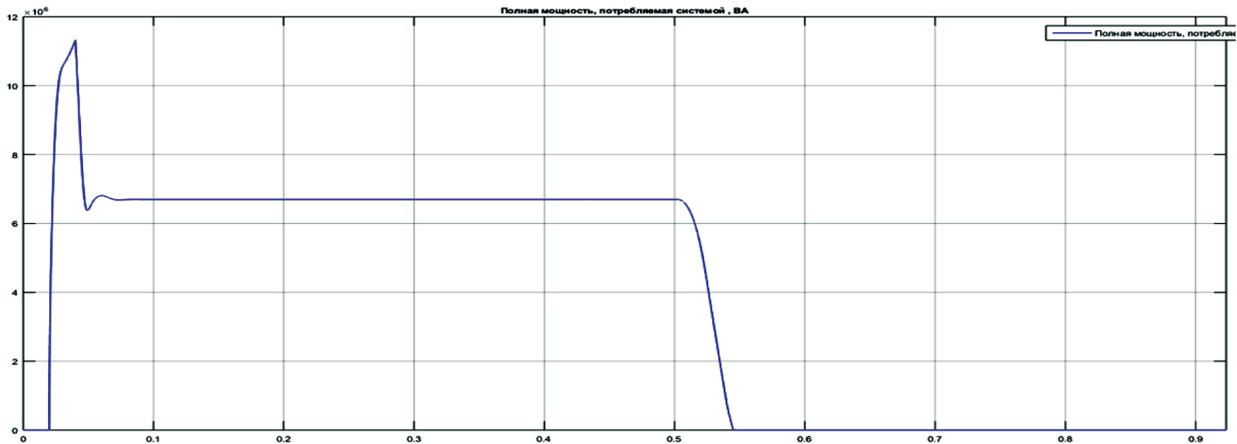


Рис. 3. График полной мощности, потребляемой установкой из сети при включении и отключении ($t = 0,5$ с) установки

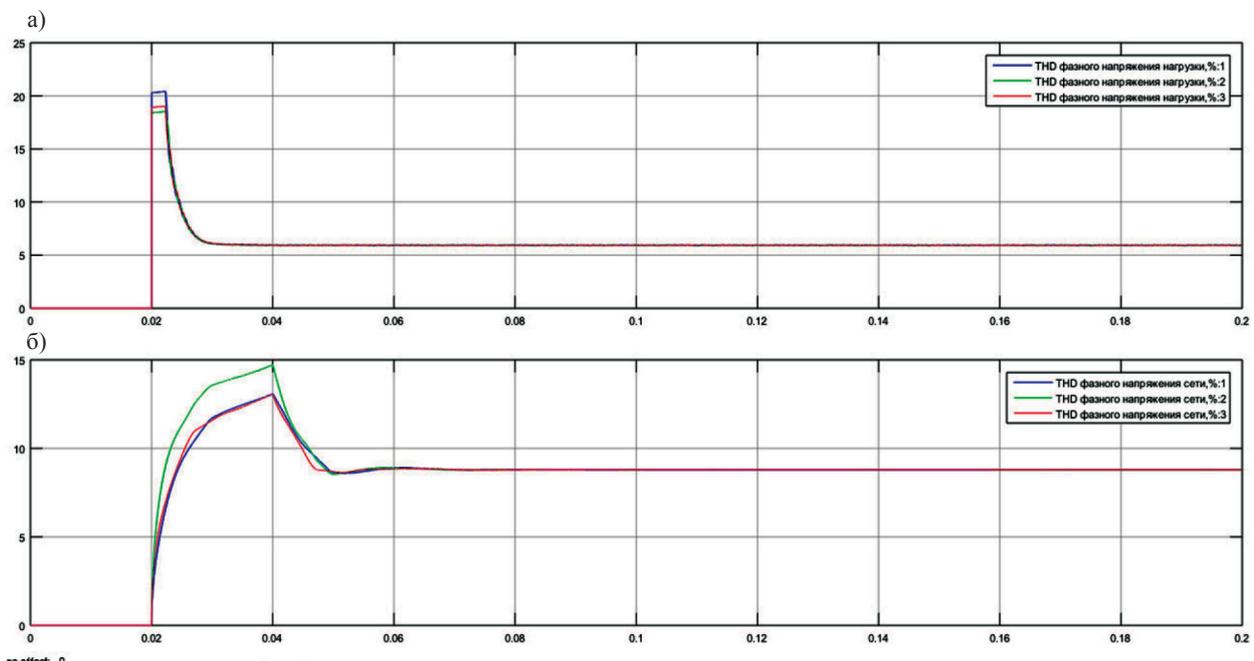


Рис. 4. Графики коэффициента нелинейных искажений (ТНД, %) кривых фазных напряжений нагрузки (а) и сети (б)

Активные потери мощности в системе приведены в табл. 1 для различных длин кабельной линии. При указанной структуре ЕЭЭС эти потери составили 3,6 % от полной активной мощности, потребляемой из сети.

**Потери активной мощности и напряжения в системе
при различных длинах кабельной линии постоянного тока**

Длина кабельной линии, км	Потери активной мощности, %	Потери напряжения в кабельной линии, %
15	3	0,42
35	3,6	1,05
50	4,6	1,9
100	5,1	3,77
250	8,7	6,6
500	14,5	12,8

Моделирование структуры 2. Для данной структуры в качестве кабеля для подводной прокладки выбран кабель 2SX(FL)2XR11 20/35Кв фирмы «Nexans» со следующими характеристиками:

- удельная емкость кабеля — 0,17 мкФ/км;
- удельное сопротивление кабеля переменному току — 0,34 Ом/км;
- удельная индуктивность кабеля — 0,42 мГн.

Двигатель представлен активно-индуктивной нагрузкой.

На рис. 5 из графика переходного процесса по мощности, потребляемой из сети, видно, что пиковые значения мощности приходятся на включение установки и составляют около 13 МВ·А, а установившееся (нормальное) значение потребляемой мощности системы — около 8 МВ·А. Значения коэффициентов нелинейных искажений кривой напряжения на входе / выходе системы 6,5 % и 11 % соответственно (рис. 6).

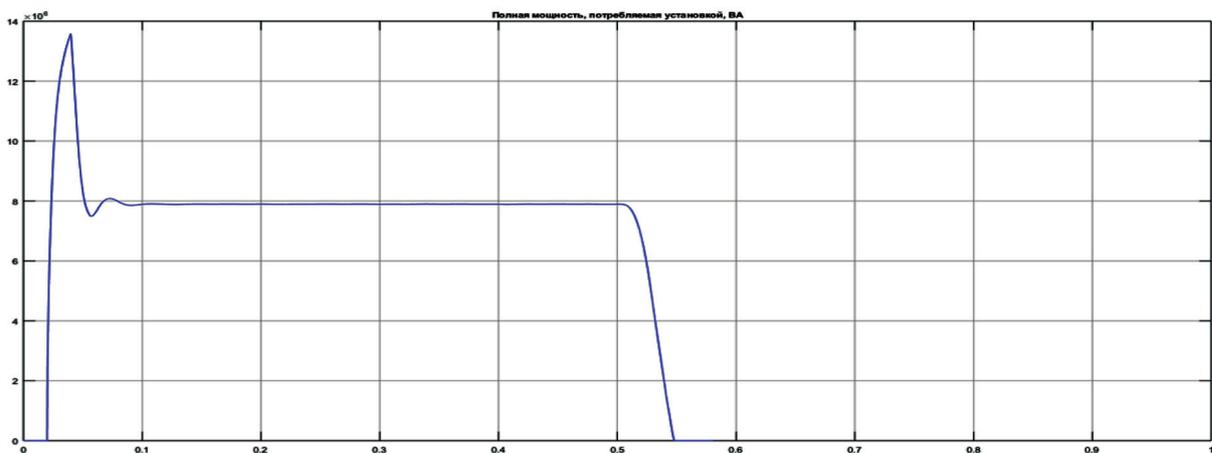


Рис. 5. График полной мощности, потребляемой установкой из сети при включении и отключении ($t = 0,5$ с) установки



б)

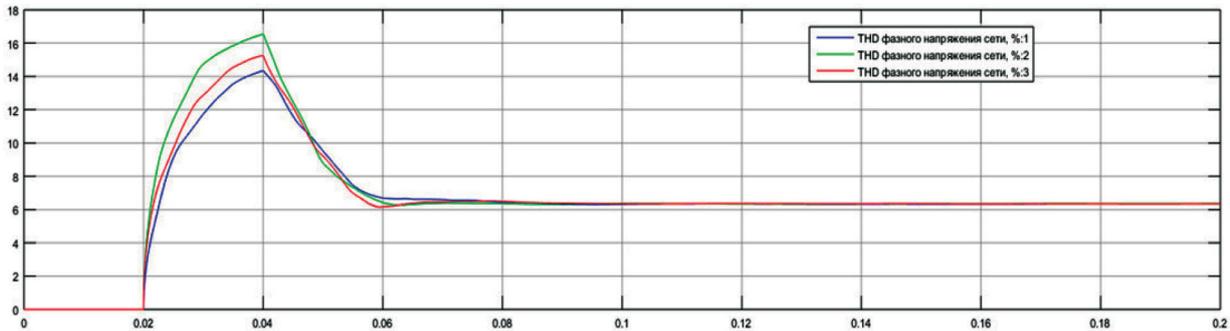


Рис. 6. Графики коэффициента нелинейных искажений (ТНД) кривых фазных напряжений нагрузки (а) и сети (б)

Активные потери мощности в системе отображены в табл. 2 для различных длин кабельной линии. При указанной структуре ЕЭЭС потери составили 8,5 % от полной активной мощности, потребляемой из сети. Динамика роста потерь с увеличением кабельной линии для ЕЭЭС с HVAC существенно выше согласно данным, приведенным в табл. 1 и 2.

Таблица 2

Потери активной мощности и напряжения в системе при различных длинах кабельной линии переменного тока

Длина кабельной линии, км	Потери активной мощности, %
15	5,3
35	8,5
50	13,2
100	58,2
250	61
500	78

Оценка надежности вариантов структурных схем. В рамках расчета надежности в связи со специфичностью системы рассматривался лишь критерий безотказности. При проведении анализа структур на надежность зададимся рядом следующих определений и допущений.

1. Работоспособность системы — мощность ПДК — не менее 2/3 от номинальной мощности, без снижения качества напряжения. Неспособность системы обеспечивать работоспособность является отказом системы.

2. Интенсивность отказов оборудования $\lambda(t)$ принимается постоянной, что является допустимым для элементов полупроводниковой техники и трансформаторов.

3. Элементы оборудования принимаются восстанавливаемыми. Расчет производится до первого отказа.

4. Обе системы рассматриваются с учетом двойного резервирования силового канала.

5. Отказами автоматов, аппаратов ручной коммутации и кабельной линии пренебрегаем.

Исходя из предложенных условий, составим расчетные схемы обоих вариантов с учетом резервирования. Структурные схемы вариантов 1 и 2 с указанием коэффициентов интенсивностей отказов отображены на рис. 1 и 2 соответственно. На основании представленных схем вычислим вероятность безотказной работы структур методом путей и сечений. Графики зависимости вероятности безотказной работы от времени (в годах) представлены на рис. 7, откуда видно, что вероятность безотказной работы для требуемого срока службы (25 лет) системы HVAC составит 0,9, а для системы HVDC — 0,6.

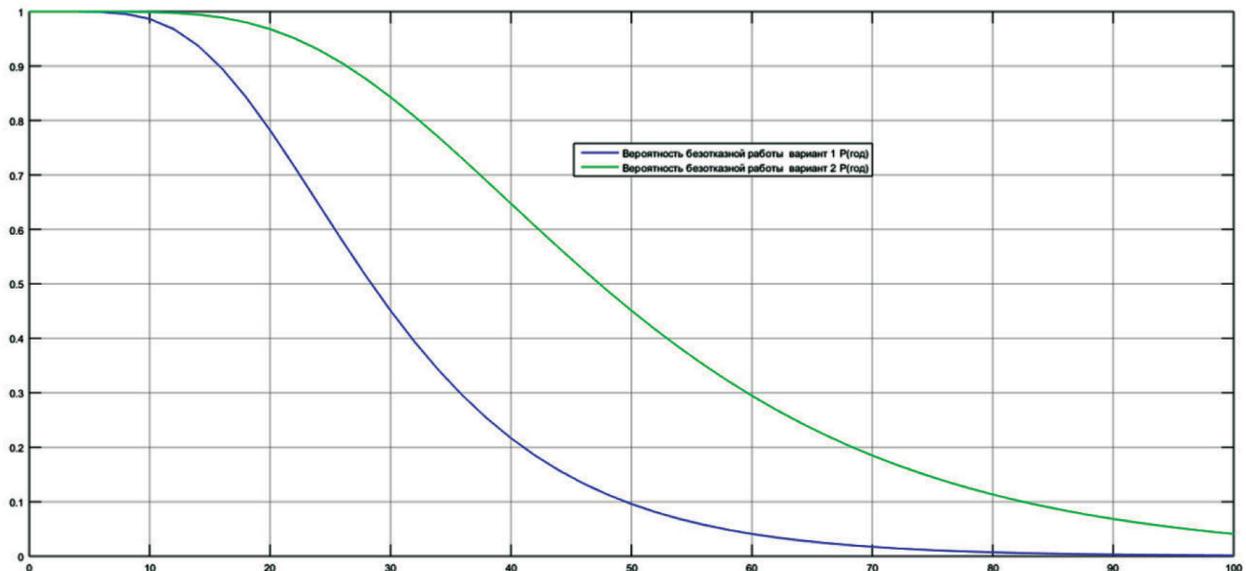


Рис. 7. Вероятности безотказной работы вариантов структур от времени эксплуатации

Обсуждение (Discussion)

Полученные результаты свидетельствуют о более высоких показателях энергоэффективности систем HVDC (аналогично заявленному в [1] и [3]). Сравнительные характеристики линии переменного и постоянного тока являются адекватными. Показатели потерь в кабельной линии переменного тока соотносятся со справочными данными по кабелям фирмы «Nexans» без учета реактивной составляющей. Анализ потерь для каждой системы является индивидуальным с учетом уровней напряжения и мощности установки, поэтому сравнительный анализ с другими источниками некорректен.

Динамика активных потерь учитывает неизменный уровень мощности и напряжения для обоих вариантов, поэтому для протяженных (более 100 км) линий потери полной активной мощности достигали 78 % для HVAC и 14,5 % для HVDC, что показывает возможность использования данных уровней напряжения при передаче энергии с учетом допустимых потерь, однако структуры систем позволяют поднять уровень напряжения для минимизации уровня потерь.

Имеющиеся характеристики безотказности обеих систем указывают на основной источник отказов — преобразователь частоты. Усложнение конструкции за счет введения дополнительных полупроводниковых приборов приводит к существенному уменьшению вероятности безотказной работы системы.

Выводы (Summary)

При сравнительном анализе вариантов электроэнергетической системы (ЭЭС) ПДК с линиями передачи на переменном и постоянном токе рассмотрены параметры качества, энергоэффективности и надежности. Наибольшей энергоэффективностью обладает система HVDC тока за счет отсутствия реактивных потерь, как указано в [2]. Потери полной мощности в системе HVAC превышают аналогичные в системе HVDC не менее чем на 1 МВ×А. Объем потерь в системе HVDC по результатам расчетов сопоставимы с результатами, полученными в [9].

Влияние на питающую сеть, согласно рис. 4 и 6, сопоставимы для обеих систем, однако за счет многоуровневой системы преобразования структуры 1 качество выходного напряжения преобразователя выше, что положительно сказывается на надежности и долговечности приводного двигателя, однако качество напряжения на нагрузке для структуры 1 существенно выше, поэтому габариты фильтра для получения требуемого уровня THD для структуры 2 тоже будут существенно выше.

Целесообразность применения HVDC структуры для ЭЭС ПДК требует увеличения показателя безотказности системы, что может быть выполнено за счет дополнительного резервирования на уровне инвертора, создания многокаскадных многоуровневых схем с увеличенным запасом по мощности или снижения количества полупроводниковых ключей инвертора. Для согласования высоких уровней выходного напряжения требуется применение систем с высоковольтными электродвигателями по аналогии с [10]. Дальнейшее уменьшение потерь в системе HVDC достигается путем увеличения напряжения передачи и последующим увеличением уровня инвертора.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Chokhawala R.* DC Transmission to Offshore Installations / R. Chokhawala, A. Mæland, T. F. Nestli // *The Journal of Offshore Technology*. — 2004. — Vol. 12. — Pp. 4–10.
2. *Hörle N.* Electrical supply for offshore installations made possible by use of VSC technology / N. Hörle, K. Eriksson, A. Maeland, T. Nestli // *Cigré 2002 Conference*. – Paris, France, 2002.
3. *Laird B.* Electrification of offshore platforms. Bellona Foundation report / B. Laird, M. Holm, F. Hauge. — 2007.
4. *Nestli T. F.* A Very High Power IGBT Based Variable Speed Drive: 40-MW, 60-kV Drive with 70-km Subsea DC Link. Offshore Applications from State of the Art to Future Trends / T. F. Nestli, T. Chr. Stensholt // *Proceedings of the international conference “Power electronics intelligent motion power quality” (PCIM Europe)*. — Nurnberg, Germany, 2004. — Vol. 2. — Pp. 11.
5. *Asplund G.* Electric power transmission to distant loads by HVDC Light / G. Asplund, K. Erikson, B. Drugge // *Distribution 2000 conference in Sydney, Australia*. — 2000.
6. *Haileselassie T.M.* Multi-terminal VSC-HVDC system for integration of offshore wind farms and green electrification of platforms in the North Sea / T. M. Haileselassie, M. Molinas, T. Undeland // *Nordic Workshop on Power and Industrial Electronics (NORPIE/2008)*. — Espoo, Finland: Helsinki University of Technology, 2008. — Vol. 8. — Pp. 8.
7. *Lamell J. O.* Offshore platform powered with new electrical motor drive system / J. O. Lamell, T. Trumbo, T. F. Nestli // *Petroleum and Chemical Industry Conference, 2005. Industry Applications Society 52nd Annual*. — IEEE, 2005. — Pp. 259–266. DOI: 10.1109/PCICON.2005.1524562.
8. *Asplund G.* A novel approach to providing on route power supplies to rural and urban communities in close proximity to the extra high voltage DC transmission line / G. Asplund, A. Williamson // *Power Engineering Society Conference and Exposition in Africa, 2007. PowerAfrica’07. IEEE*. — IEEE, 2007. — Pp. 1–6. DOI: 10.1109/PESAFR.2007.4498119.
9. *Marvik J. I.* Electrification of offshore petroleum installations with offshore wind integration / J. I. Marvik, E. V. Øyslebø, M. Korpås // *Renewable energy*. — 2013. — Vol. 50. — Pp. 558–564. DOI: 10.1016/j.renene.2012.07.010.
10. *Hyttinen M.* New application of voltage source converters (VSC) HVDC to be installed on the gas platform Troll A / M. Hyttinen, J.-O. Lamell, T. Nestli // *CIGRE*. — Paris, 2004.

REFERENCES

1. Chokhawala, R., Asmund Mæland, and Tom F. Nestli. “DC Transmission to Offshore Installations.” *The Journal of Offshore Technology* 12 (2004): 4–10.
2. Hörle, Nils, K. Eriksson, Asmund Mæland, and Tom F. Nestli. “Electrical supply for offshore installations made possible by use of VSC technology.” *Cigré 2002 Conference*. Paris, France, 2002.
3. Laird, B., M. Holm, and F. Hauge. *Electrification of offshore platforms. Bellona Foundation report*. 2007.
4. Nestli, T. F., and T. Chr. Stensholt. “A Very High Power IGBT Based Variable Speed Drive: 40-MW, 60-kV Drive with 70-km Subsea DC Link. Offshore Applications from State of the Art to Future Trends.” *Proceedings of the international conference “Power electronics intelligent motion power quality” (PCIM Europe)*. Vol. 2. Nurnberg, Germany, 2004. 11.
5. Asplund, Gunnar, Kjell Eriksson and Birger Drugge. “Electric power transmission to distant loads by HVDC Light.” *Distribution 2000 conference in Sydney, Australia*. 2000.

6. Haileselassie, Temesgen M., Marta Molinas and Tore Undeland. "Multi-Terminal VSC-HVDC System for Integration of Offshore Wind Farms and Green Electrification of Platforms in the North Sea." *Nordic Workshop on Power and Industrial Electronics (NORPIE/2008)*. Vol. 8. Espoo, Finland: Helsinki University of Technology, 2008. 8.

7. Lamell, Jan O., Timothy Trumbo, and Tom F. Nestli. "Offshore platform powered with new electrical motor drive system." *Petroleum and Chemical Industry Conference, 2005. Industry Applications Society 52nd Annual. IEEE*, 2005. DOI: 10.1109/PCICON.2005.1524562.

8. Asplund, Gunnar, and Andrew Williamson. "A novel approach to providing on route power supplies to rural and urban communities in close proximity to the extra high voltage DC transmission line." *Power Engineering Society Conference and Exposition in Africa, 2007. PowerAfrica'07. IEEE. IEEE*, 2007. DOI: 10.1109/PESAfr.2007.4498119.

9. Marvik, Jorun I., Eirik V. Øyslebø, and Magnus Korpås. "Electrification of offshore petroleum installations with offshore wind integration." *Renewable energy* 50 (2013): 558–564. DOI: 10.1016/j.renene.2012.07.010.

10. Hyttinen, Mats, Jan–Olof Lamell, and Tom F. Nestli. "New application of voltage source converters (VSC) HVDC to be installed on the gas platform Troll A." *CIGRE*. Paris, 2004.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Сорокин Илья Владимирович —
инженер
ФГУП «Крыловский государственный
научный центр»
196158, Российская Федерация, Санкт-Петербург,
Московское шоссе, 44
e-mail: iliya1111111@mail.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Sorokin, Iliya V. —
Engineer
Krylov State Research Centre
44 Moskovskoe shosse, St.Petesburg, 196158,
Russian Federation
e-mail: iliya1111111@mail.ru

Статья поступила в редакцию 17 сентября 2018 г.

Received: September 17, 2018.

DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-5-1063-1074

REDUCING THE INFLUENCE OF OPERATING CONDITIONS ON THERMOMECHANICAL LOADING OF THE ENGINE BY THE JET OF WATER ON THE SCREW

A. S. Sharatov

Kerch State Maritime Technological University,
Kerch, Republic of Crimea, Russian Federation

The article assesses the possibility to influence the parameters of thermal and mechanical stress of the main engine running on the propeller of a fixed pitch. The operation of the main engine in changing operating conditions of the vessel, subject to maintaining the nominal speed, is characterized by the presence of overload in terms of thermal and mechanical stress. This leads to the need to reduce engine speed, reduce fuel efficiency. Under these conditions, the parameters of the main engine in each mode are dependent on the external operating conditions. The scientific and technical literature and ship documentation do not show the dependence of the engine parameters on the external operating conditions of the vessel, causing a change in the screw characteristics, which reduces the efficiency of the technical operation of the vessel. In order to assess the influence of external factors on the parameters of the main engine, the data presented in the electronic ship documentation was processed, which allowed to form graphical dependences of the parameters of thermal and mechanical stress in relative form for each parameter under consideration when external conditions change. Verification of the obtained dependences is performed using universal characteristics. To generalize the results obtained, the parameter relative step of the propeller is used as an element characterizing the total external impact of operating conditions on the engine. The use of a water supply system affects the hydrodynamic drag moment of the propeller, which leads to different weighting of the screw characteristics of the main engine, reducing the influence of external conditions on the parameters of thermal and mechanical stress. Explore the option of supplying additional water to the blades of the propeller with the deterioration of external conditions corresponding 10% increase in the power consumed for achieving the rated speed movement, allowing to reduce the decrease in the frequency of rotation of a drive motor with 75 to 95% of nominal. According to the results, the main advantages of the propeller equipped with a slit nozzle for supplying additional water to the blades are formulated.

Keywords: marine engine, propeller, propeller characteristics, thermal tension, mechanical tension, external conditions (factors), speed, relative stride, jet impact.

For citation:

Sharatov, Alexsei S. "Reducing the influence of operating conditions on thermomechanical loading of the engine by the jet of water on the screw." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admiral S. O. Makarova* 10.5 (2018): 1063–1074. DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-5-1063-1074.

УДК 629.123

СНИЖЕНИЕ ВЛИЯНИЯ УСЛОВИЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ НА ТЕПЛОМЕХАНИЧЕСКУЮ НАГРУЖЕННОСТЬ ДВИГАТЕЛЯ ПУТЕМ СТРУЙНОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ ВОДЫ НА ВИНТ

А. С. Шаратов

ФГБОУ ВО «Керченский государственный морской технологический университет»,
Керчь, Республика Крым, Российская федерация

В статье выполнена оценка возможности воздействия на параметры тепловой и механической напряженности главного двигателя, работающего на гребной винт фиксированного шага. Работа главного двигателя в изменяющихся условиях эксплуатации судна при условии поддержания заданной частоты вращения характеризуется возможной его перегрузкой по показателям тепловой и механической напряженности. Это приводит к необходимости снижения частоты вращения двигателя. При этом параметры главного двигателя в каждом конкретном режиме являются зависимыми от внешних условий эксплуата-

ции. В научно-технической литературе и судовой документации не приводятся зависимости параметров двигателя от внешних условий эксплуатации судна, вызывающих утяжеление или облегчение винтовой характеристики. В результате под влиянием внешних условий эффективность технической эксплуатации судна изменяется. С целью оценки влияния внешних факторов на параметры главного двигателя выполнена обработка данных, приведенных в судовой документации, расчетных данных и отчетной документации машинной команды. Это позволило сформировать графические зависимости параметров тепловой и механической напряженности в относительном виде для каждого рассматриваемого параметра при изменении внешних условий. Верификация полученных зависимостей выполнена с помощью универсальных характеристик. Для обобщения полученных результатов использован параметр «относительная поступь гребного винта». Этот параметр характеризует суммарное внешнее воздействие условий эксплуатации на двигатель. Применение системы дополнительной струйной подачи воды на поверхность лопасти гребного винта оказывает влияние на гидродинамический момент сопротивления гребного винта, что приводит к изменению винтовой характеристики главного двигателя. За счет этого ограничивается суммарное влияние внешних условий на параметры тепловой и механической напряженности. Рассмотрен вариант подачи дополнительной воды на лопасти гребного винта при ухудшении внешних условий, соответствующих 10 %-му возрастанию мощности, потребляемой для достижения проектной скорости движения. Это позволяет ограничить снижение частоты вращения двигателя с 75 % до 95 % номинальной. По результатам исследований сформулированы основные преимущества гребного винта, оборудованного целевой насадкой подачи дополнительной воды на лопасти.

Ключевые слова: судовой двигатель, гребной винт, винтовая характеристика, тепловая напряженность, механическая напряженность, внешние условия эксплуатации, частота вращения, относительная поступь винта, струйное воздействие.

Для цитирования:

Шаратов А. С. Снижение влияния условий эксплуатации на тепломеханическую нагруженность двигателя путем струйного воздействия воды на винт / А. С. Шаратов // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2018. — Т. 10. — № 5. — С. 1063–1074. DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-5-1063-1074.

Введение (Introduction)

К основным задачам технической эксплуатации главной энергетической установки (ГЭУ) судна относятся: предотвращение перегрузки главного двигателя (ГД) в изменяющихся условиях плавания, сохранение экономичности работы судовой энергетической установки судна [1], обеспечение достижения конструктивного коэффициента энергетической эффективности [2], [3]. В условиях эксплуатации судна двигатель является зависимым элементом (мощность, вырабатываемая двигателем, зависит от мощности, потребляемой гребным винтом) [4]. Для оценки изменений условий плавания и теплонагруженности ГД в эксплуатации может использоваться винтовая характеристика [5]. В технической литературе [6] и документации [7] приводятся характеристики двигателя в зависимости от частоты вращения при работе двигателя по номинальной винтовой характеристике. При этом не акцентируется внимание на утяжелении или облегчении винтовой характеристики при изменении внешних условий, что может привести к перегрузке ГД по теплонапряженности и механической напряженности, а также снижению эффективности его эксплуатации [8]. Струйное воздействие дополнительной жидкости, подаваемой через целевую насадку на лопасти гребного винта [9], позволяет воздействовать на момент сопротивления гребного винта, т. е. изменять поступь гребного винта (ГВ), вне зависимости от внешних факторов. Это позволит снизить влияние внешних условий на тепловую и механическую напряженность ГД, обеспечив возможность предотвращения его перегрузки, без изменения цикловой подачи топлива.

Проанализируем влияние «утяжеления» [10] или «облегчения» [11] винтовой характеристики в условиях эксплуатации на теплонагруженность ГД. Цель работы заключается в оценке возможности воздействия на параметры тепловой и механической напряженности ГД, работающего по ненормальной винтовой характеристике, путем струйной подачи дополнительной воды на лопасти гребного винта. Для достижения данной цели необходимо решить следующие задачи.

1. Оценить зависимость тепловой и механической напряженности ГД от условий эксплуатации (изменения относительной поступи ГВ) судна на примере малооборотного двигателя фирмы «MAN B&W» [7].

2. Произвести верификацию полученных зависимостей с помощью универсальных характеристик двигателя 6ЧН18/22 (судно «Катран»).

3. Провести анализ качественного изменения параметров двигателя при работе по ненормальной винтовой характеристике.

4. Оценить эффект от применения струйного воздействия дополнительно подаваемой воды на лопасти гребного винта при ухудшении внешних условий, соответствующих 10 %-му «утяжелению» винтовой характеристики (потребляемая мощность для достижения той же скорости движения судна возросла на 10 %).

Методы и материалы (Methods and Materials)

Рассматривается работа ГД с традиционным управлением на ГВ фиксированного шага. При анализе параметров двигателя работа систем VIT и VTT не учитывается. В процессе эксплуатации судна ГД в любой промежуток времени может быть перегружен по тепловой и механической напряженности, что приводит к необходимости управления параметрами, обеспечивая их снижение до допустимых значений.

Для оценки механической напряженности двигателя используются следующие параметры:

– p_z — максимальное давление сгорания;

– M_k — крутящий момент двигателя, затрачиваемый на преодоление гидродинамического момента сопротивления на ГВ;

– p_e — среднее эффективное давление.

Тепловая напряженность оценивается по температуре отработавших газов двигателя t_g .

Экономичность двигателя оценивается по расходу топлива на милю пройденного пути B_m .

Предпочтительным вариантом оценки показателей тепловой и механической напряженности ГД, работающего по винтовой характеристике, является рассмотрение универсальных характеристик. Относительная поступь гребного винта в пределах одной винтовой характеристики не изменяется, и этот параметр используется как показатель воздействия внешних условий на ГД.

Результаты (Results)

1. *Зависимость тепловой и механической напряженности ГД от условий эксплуатации (изменения относительной поступи ГВ) судна на примере двигателя марки MAN B&W 7S70MC.*

Для малооборотных ДВС универсальные характеристики недоступны, поэтому для оценки тепловой и механической напряженности воспользуемся технической литературой [7], а также данными ходовых испытаний [12]. На рис. 1 показана типовая зависимость параметров судового двигателя 7S70MC MAN B&W при изменении частоты вращения ГВ фиксированного шага. Эти параметры соответствуют номинальной винтовой характеристике ГД в эталонных условиях эксплуатации. Используя рекомендации фирмы «MAN B&W» [13] по подбору двигателя и результаты расчетов в программе CEAS Engine Calculations [14], сформируем исходные данные для анализа отчетной документации машинной команды.

Обработка данных, приведенных в судовой и отчетной документации машинной команды, позволила сформировать графические характеристики, построенные в относительном виде (относительно номинального значения). Графики изменения каждого параметра тепловой и механической напряженности двигателя при утяжелении или облегчении винтовой характеристики показаны на рис. 2–4 (на рис. 2 — относительное максимальное давление сгорания, на рис. 3 — относительный момент сопротивления ГВ).

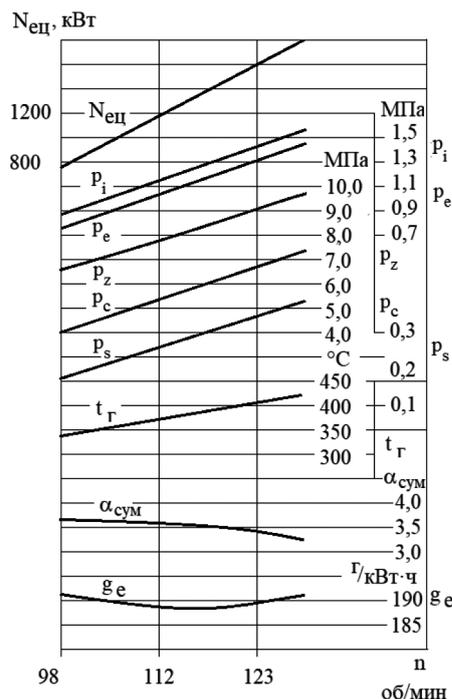


Рис. 1. Зависимость основных параметров главного двигателя 7S70MC от частоты вращения:
 $N_{\text{еП}}$ — эффективная цилиндровая мощность; p_i — среднее индикаторное давление;
 p_e — среднее эффективное давление; p_z — максимальное давление сгорания;
 p_c — давление в конце сжатия; p_s — давление наддува; t_{Γ} — температура отработавших газов;
 $\alpha_{\text{сум}}$ — суммарный коэффициент избытка воздуха; g_e — удельный эффективный расход топлива

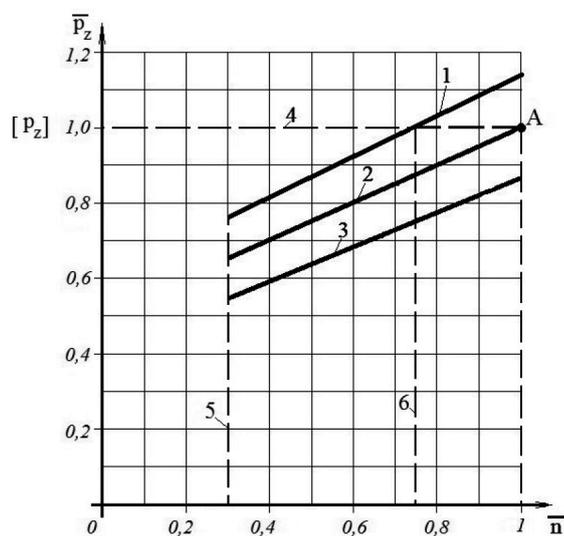


Рис. 2. Относительное максимальное давление сгорания \bar{p}_z при работе ДВС по винтовой характеристике: 1 — утяжеленная ВХ; 2 — номинальная ВХ; 3 — облегченная ВХ; 4 — ограничение по максимальному давлению сгорания; 5 — ограничение по минимальной частоте вращения; 6 — ограничение по частоте вращения при работе двигателя по утяжеленной ВХ; А — точка номинального режима работы

Максимальное давление сгорания p_z растет пропорционально частоте вращения. При работе по утяжеленной винтовой характеристике (ВХ), характеризующейся большей потребляемой мощностью при неизменной частоте вращения, p_z раньше достигнет своего предельно допустимого

значения (см. рис. 2), ограничивая диапазон работы ДВС. Утяжеление ВХ приводит к увеличению потребляемой мощности, что допустимо в пределах ограничительной характеристики. Однако при выходе за ограничительные характеристики для предотвращения перегрузки ГД принудительно снижается цикловая подача топлива, что приводит к необходимости принудительно снизить частоту вращения двигателя для обеспечения допустимого давления сгорания.

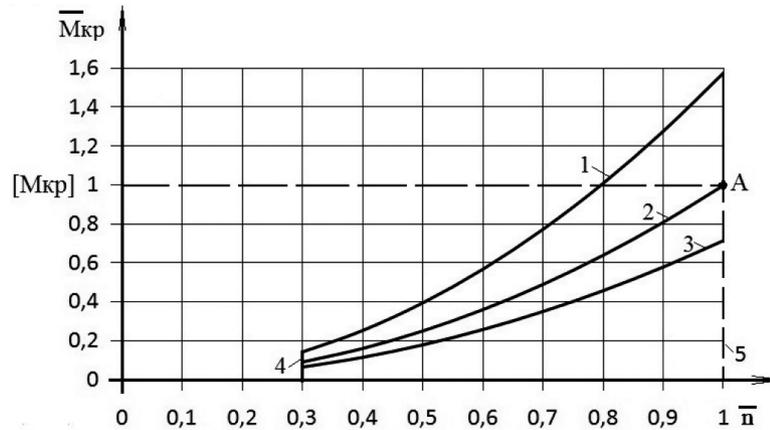


Рис. 3. Относительный момент сопротивления гребного винта $\bar{M}_{кр}$ при работе ДВС по винтовой характеристике:

1 — утяжеленная ВХ; 2 — номинальная ВХ; 3 — облегченная ВХ;
 4 — ограничение по минимальной частоте вращения;

5 — ограничение по номинальной частоте вращения; А — точка номинального режима

Анализ рис. 3 показывает, что в условиях утяжеления ВХ, предотвращение перегрузки двигателя по крутящему моменту требует значительного понижения частоты вращения (до 80 % от номинальной). При дальнейшем снижении частоты вращения необходимо дополнительно уменьшить нагрузку так, чтобы значение среднего эффективного давления не превышало линию предельного момента. Обобщенно ограничения по параметрам механической напряженности показаны на рис. 4.

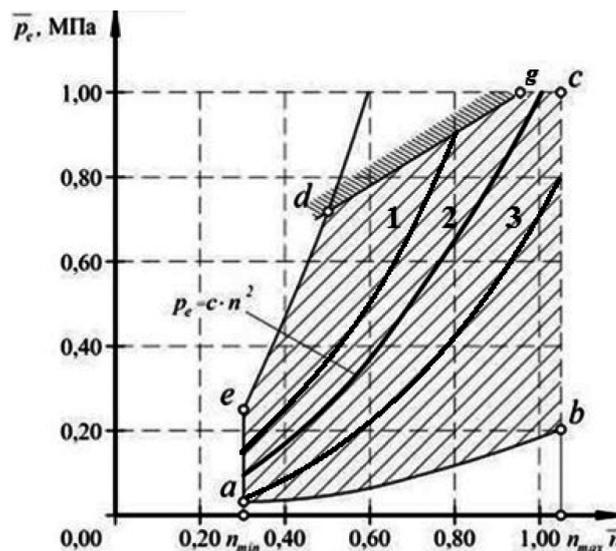


Рис. 4. Относительное среднее эффективное давление двигателя \bar{p}_e при работе по ВХ:

1 — утяжеленная ВХ; 2 — номинальная ВХ; 3 — облегченная ВХ;

ed — ограничение по тепловой напряженности; ab — ограничение по минимальной температуре;

cb — ограничение по максимальной частоте вращения;

ea — ограничение по минимальной частоте вращения; dg — ограничение по крутящему моменту;

gc — ограничение по мощности для длительной работы

На рис. 5 показана относительная температура отработавших газов ГД. Особенностью эксплуатации современных ДВС морского флота является наличие аварийно-предупредительной сигнализации. Конструктивно в эксплуатации для ГД замеряется и контролируется значительное

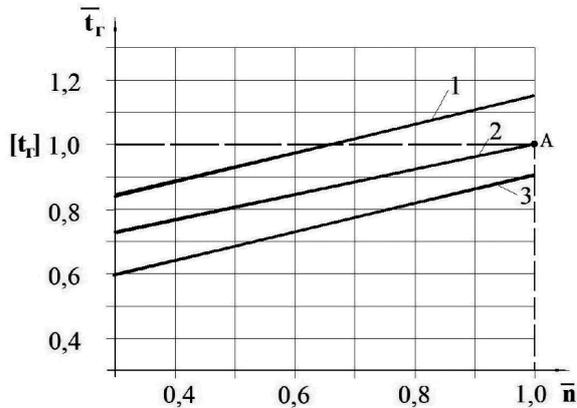


Рис. 5. Относительная температура отработавших газов \bar{t}_r двигателя при работе по ВХ:
1 — утяжеленная ВХ;
2 — номинальная ВХ; 3 — облегченная ВХ;
А — точка номинального режима

количество параметров, часть которых является актуальными для контроля теплонапряженности ГД. Наиболее распространенным параметром, который контролируется в эксплуатации, является температура отработавших газов (см. рис. 5), выход которой за допустимые пределы может свидетельствовать о перегрузке двигателя. Сложность анализа теплонапряженности двигателя по температуре отработавших газов связана со значительным количеством следующих факторов, оказывающих влияние на этот параметр:

- внутреннее состояние конструкции двигателя и ГЭУ;
- качество охлаждения двигателя [15];
- внешние условия эксплуатации.

Если проанализировать внутренние факторы [16], оказывающие влияние на температуру отработавших газов, и принять их влияние постоянным, то можно получить следующие допущения, позволяющие выполнить анализ влияния внешних факторов на тепловую напряженность двигателя:

- температура отработавших газов двигателя прямо пропорциональна мощности двигателя и цикловой подаче топлива;
- при постоянной мощности, потребляемой ГВ, при утяжелении ВХ температура повышается, при облегчении ВХ — снижается.

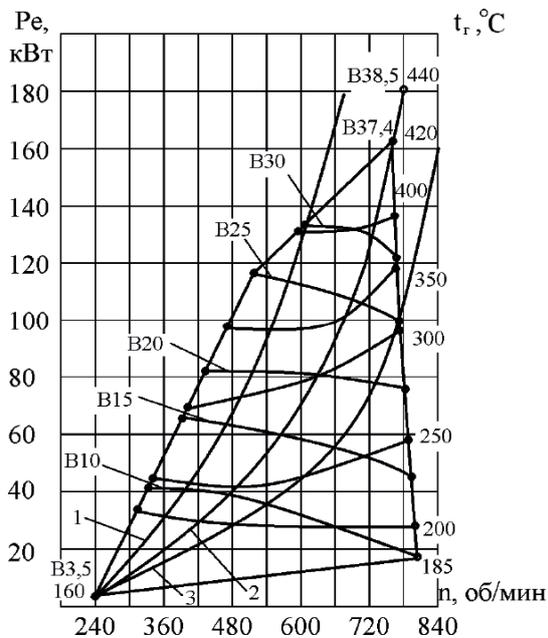


Рис. 6. Поле температур отработавших газов двигателя при работе по ВХ:
 P_e — мощность эффективная, кВт;
 n — частота вращения, об/мин;
 t_r — температура отработавших газов по цилиндрам, °C; В — часовой расход топлива, кг/ч

2. Качественное подтверждение зависимости, полученных с помощью универсальных характеристик двигателя 6ЧН18/22.

Для качественного дополнительного подтверждения правильности полученных данных (верификации) воспользуемся известными данными для высокооборотных ДВС на примере справочных данных двигателя 6ЧНС18/22, установленного на рейдово-портовом нефтеналивном бункеровщике «Катран» с мощностью ГД 165 кВт [17]. Поле температур отработавших газов двигателя при работе по ВХ показано на рис. 6.

Качественное совпадение процессов, протекающих при изменении ВХ (рис. 6), с данными, полученными из справочной литературы [6], свидетельствует об успешной верификации приведенных результатов, характеризующих работу малооборотных двигателей.

3. Анализ качественного изменения параметров двигателя при работе по ненормальной винтовой характеристике.

Проанализировав графики на рис. 2–5, выполним качественную оценку изменения показателей тепловой и механической напряженности ГД при изменении вида ВХ (таблица).

Оценка изменения показателей тепловой и механической напряженности главного двигателя при изменении вида винтовой характеристики

Параметр	Изменение винтовой характеристики	
	«утяжеление»	«облегчение»
Размер неиспользованной мощности	Уменьшается	Увеличивается
Запас по частоте вращения	»	»
Расход мощности (цикловой подачи топлива) на поддержание заданной частоты вращения ГВ [5]	Увеличивается	Уменьшается
Частота вращения, при которой достигается номинальное значение среднего эффективного давления	Уменьшается	Увеличивается
Максимальное давление сгорания при заданной частоте вращения [6]	Увеличивается	Уменьшается
Гидродинамический момент сопротивления ГВ	»	»
Температура отработавших газов [6]	»	»
Механический КПД двигателя [5]	Уменьшается	Увеличивается
Удельный эффективный расход топлива [18]	Увеличивается	»
Скорость судна [5]	Уменьшается	»
Относительная поступь гребного винта (эквивалентное шаговое отношение) [5]	Увеличивается	Уменьшается
Среднее индикаторное давление [19]	»	»
Загрязнение атмосферы окислами азота [20]	»	»
Температура неохлаждаемых деталей двигателя [20]	»	»
КПД гребного винта [21]	Уменьшается	Увеличивается
Неравномерность работы двигателя [21]	Увеличивается	Уменьшается
Износ цилиндрических втулок [6]	»	»

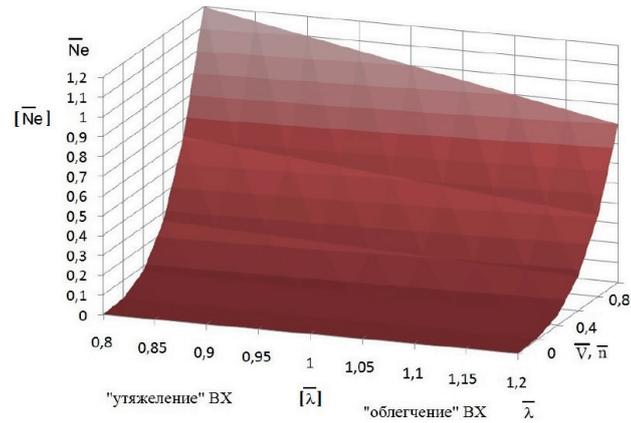
На основе данных, приведенных в таблице, можно сделать следующий вывод: *изменение взаимного расположения ВХ и ограничительных характеристик оказывает значительное влияние на тепловую и механическую напряженность двигателя*, что свидетельствует о возможности использования целенаправленного изменения взаиморасположения характеристик с целью управления теплонагруженностью двигателя. Это позволит изменить диапазон работы ГД, повысить ресурс деталей и приведет к повышению топливной экономичности.

Для обобщения полученных результатов используем параметр «относительная поступь гребного винта» λ как величину, характеризующую суммарное внешнее воздействие. Для наглядности результаты выполненного численного анализа представлены на рис. 7 в виде трехмерных графиков в относительных величинах.

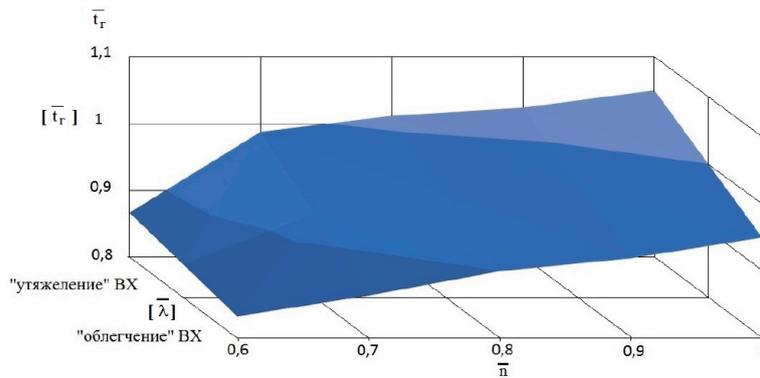
Анализ графиков, приведенных на рис. 7, позволяет утверждать, что тепломеханическая нагрузка ГД может быть снижена двумя способами: изменением частоты вращения двигателя и / или изменением относительной поступи ГВ. В современных условиях эксплуатации снижение тепломеханической нагрузки двигателя достигается на следующих этапах:

- на этапе проектирования за счет доработки ГВ (изменение относительной поступи);
- на этапе эксплуатации за счет регулятора частоты вращения (управление частотой вращения в зависимости от режима работы).

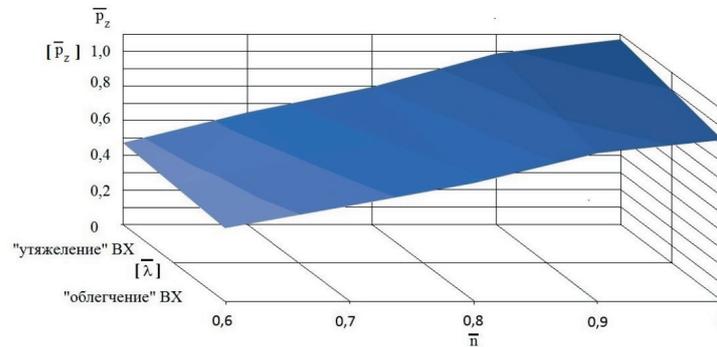
а)



б)



в)



г)

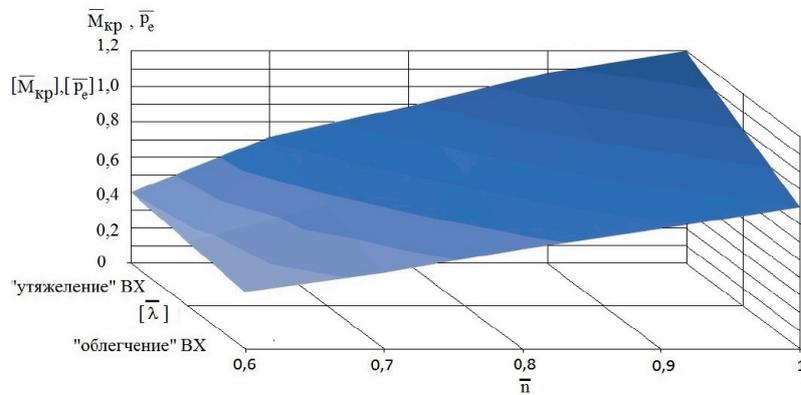


Рис. 7. Трехмерные графики: а — зависимости мощности, потребляемой ГВ, от относительной поступи ГВ λ , скорости судна V и частоты вращения ГВ n ; б — зависимости температуры отработавших газов t_r от вида ВХ и частоты вращения ГД n ; в — зависимости максимального давления сгорания p_z от вида ВХ и частоты вращения ГД n ; г — зависимости момента сопротивления вращению гребного винта $M_{кр}$ и среднего эффективного давления p_e от вида ВХ и частоты вращения ГД n

Все это позволяет предотвратить перегрузку ГД по частоте вращения и зависящим от нее параметрам. Недостатком данного способа является снижение частоты вращения ГД, изменение скорости судна и расхода топлива на милю пройденного пути. Для снижения влияния внешних условий с целью предотвращения перегрузки ГД требуется разработка методов или средств коррекции параметров ГВ в эксплуатации. Это позволит обеспечить сохранение оптимальной тепло-механической нагруженности двигателя и даст возможность сохранить расход топлива на милю пройденного пути.

Применение системы струйной подачи воды через щелевую насадку, установленную на входной кромке подсосывающей поверхности лопасти [22], позволяет искусственно изменять взаиморасположение винтовой и ограничительных характеристик. Это дает возможность управлять параметрами тепловой и механической напряженности путем «облегчения» или «утяжеления» винтовых характеристик ГД. На рис. 7 показаны изменения параметров теплонагруженности двигателя при «облегчении» ВХ. При этом достигается ограничение влияния внешних условий на эксплуатационные показатели ГД на всех режимах эксплуатации.

Обсуждение (Discussion)

Выполним оценку влияния струйного воздействия дополнительной воды, подаваемой на лопасти ГВ, при ухудшении внешних условий. Для примера рассмотрим работу двигателя 7S70MC (см. рис. 1) в условиях, соответствующих 10 %-му «утяжелению» ВХ (мощность, потребляемая ГВ, для достижения той же скорости движения судна возросла на 10 %). Главный двигатель, работая по действительной ВХ, развивает цилиндровую мощность 1300 кВт при 118 об/мин. При утяжелении ВХ и повышении гидродинамического момента сопротивления затраты мощности возрастают на 10 % при постоянной частоте вращения. Наблюдается перегрузка двигателя по p_z на 12 %, по $M_{кр}$ на 6 %, по p_e на 6 %, по t_r на 15 %. Для предотвращения перегрузки двигателя по параметрам тепловой и механической напряженности регулятор частоты вращения снижает цикловую подачу топлива.

После снижения регулятором цикловой подачи топлива частота вращения падает до 75 % номинальной, параметры тепловой и механической напряженности не превышают максимальные. При этом их средние значения завышены и составляют: p_z — 100 %, $M_{кр}$ — 100 %, p_e — 82 %, t_r — 100 %. Удельный эффективный расход топлива увеличился на 1 %, что на фоне снижения скорости судна приводит к перерасходу топлива на милю пройденного пути.

Подача дополнительной воды на лопасти гребного винта позволит ограничить перегрузку двигателя по максимальному давлению сгорания, крутящему моменту и температуре отработавших газов. Это обеспечивает ограничение перегрузки ГД по показателям: p_z до 103 %, $M_{кр}$ — до 100,5 %, p_e — до 103 %, t_r — до 105 %, без изменения частоты вращения. Дальнейшее снижение тепломеханической нагруженности ГД достигается незначительным изменением частоты вращения. При этом падение частоты вращения до 95 %, вместо 75 % от номинальной, не приведет к возрастанию удельного расхода топлива и будет достигнуто минимальное изменение расхода топлива на милю пройденного пути.

Заключение (Conclusion)

В результате оценки параметров тепловой и механической напряженности двигателя, работающего по ненормальной ВХ, качественно показана возможность ограничения влияния внешних условий на показатели работы ГД. Показано, что подача дополнительной воды на лопасти ГВ позволяет целенаправленно изменять взаиморасположение винтовой и ограничительных характеристик, что позволит ограничить опасность перегрузки двигателя по показателям тепловой и механической напряженности следующим образом:

- за счет ограничения изменения частоты вращения;
- за счет снижения гидродинамического момента сопротивления;
- за счет изменения относительной поступи ГВ.

На основании изложенного формулируем основные преимущества ГД, работающего на ГВ фиксированного шага, оборудованного щелевой насадкой подачи дополнительной воды на лопасти:

– возможность обеспечить постоянную теплонапряженность ГД при изменении внешних условий эксплуатации путем ограничения их влияния;

– возможность оптимизировать режим работы двигателя, ограничив его перегрузку по тепловой и механической напряженности для поддержания требуемых параметров (скорости судна, расхода топлива на милю пройденного пути).

«Облегчение» ВХ в условиях эксплуатации позволяет наиболее полно использовать мощность двигателя без обязательной корректировки конструктивного шага ГВ. При этом снижается опасность перегрузки ГД при изменении внешних условий эксплуатации по показателям тепловой и механической напряженности.

Гребному винту со щелевой насадкой дополнительной подачи воды на лопасти [23] свойственны следующие недостатки, которые компенсируются следующими эксплуатационными преимуществами:

– более сложная конструкция и более высокая стоимость изготовления и ремонта компенсируются увеличением межремонтного периода эксплуатации;

– расход фильтрующих элементов в связи с высокими требованиями к качеству подаваемой воды компенсируется долговечностью и надежностью конструкции, сохранением проектных параметров гребных винтов в течение всего периода эксплуатации судна.

Таким образом, применение дополнительного струйного воздействия воды, подаваемой на лопасти гребного винта, позволяет снизить влияние внешних условий на тепломеханическую нагруженность главного двигателя и реализовать новые методы управления ГЭУ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Иванченко А. А.* Повышение качества проектирования и эксплуатации дизельных установок судов внедрением математического моделирования их рабочего процесса / А. А. Иванченко, Ю. В. Тамбовский // Транспортное дело России. — 2017. — № 5. — С. 169–173.

2. Международная Конвенция по предотвращению загрязнения с судов (МАРПОЛ-73/78). — СПб.: АО «ЦНИИМФ», 2017. — Кн. III. — 412 с.

3. *Zhao F.* Power management of vessel propulsion system for thrust efficiency and emissions mitigation / F. Zhao, W. Yang, W. W. Tan, W. Yu, J. Yang, and S. K. Chou // Applied Energy. — 2016. — Vol. 161. — Is. C. — Pp. 124–132. DOI: 10.1016/j.apenergy.2015.10.022.

4. *Molland A. F.* Propeller Characteristics / F. A. Molland, S. R. Turnock, D. Hudson // Ship Resistance and Propulsion: Practical Estimation of Ship Propulsive Power. — 2nd ed. — Cambridge: Cambridge University Press, 2017. — Pp. 277–312. DOI:10.1017/9781316494196.014

5. *Дитятев С. Г.* Исследование изменений винтовой характеристики судового малооборотного дизеля в эксплуатации: дис. ... канд. техн. наук; специальность: 05.08.05 — судовые энергетические установки и их элементы (главные и вспомогательные) / С. Г. Дитятев. — Л.: ЛВИМУ им. адм. С. О. Макарова, 1984. — 295 с.

6. *Возницкий И. В.* Двигатели модельного ряда МС 50-98. Конструкция, эксплуатация и техническое обслуживание / И. В. Возницкий. — М.: Моркнига, 2008. — 260 с.

7. S70MC Project guide [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://marine.man-es.com/> (дата обращения: 01.09.2018).

8. *Geertsma R. W.* Pitch control for ships with diesel mechanical and hybrid propulsion: Modelling, validation and performance quantification / R. W. Geertsma, R. R. Negenborn, K. Visser, M. A. Loonstijn, J. J. Hopman // Applied Energy. — 2017. — Vol. 206. — Pp. 1609–1631. DOI: 10.1016/j.apenergy.2017.09.103.

9. *Шаратов А. С.* Струйное воздействие на динамику гребного винта / А. С. Шаратов // Вісник двигунобудування. — 2010. — № 2. — С. 82–85.

10. *Carlton J. S.* Propeller Performance Characteristics / J. S. Carlton // Marine Propellers and Propulsion. — 3rd ed. — Butterworth-Heinemann: Elsevier Ltd., 2012. — Pp. 79–136. DOI: 10.1016/B978-0-08-097123-0.00006-X.

11. *Banawan A. A.* Prediction of the fuel saving and emissions reduction by decreasing speed of a catamaran / A. A. Banawan, M. Mosleh, I. S. Seddiek // *Journal of Marine Engineering & Technology*. — 2013. — Vol. 12. — Is. 3. — Pp. 40–48. DOI: 10.1080/20464177.2013.11020287.
12. Test result of shop trial, mitsui-m.a.n. B&W 7s70MC. — Mitsui engineering & shipbuilding Co ltd, 1995. — 15 p.
13. Basic Principles of Ship Propulsion [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://marine.man-es.com/propeller-aft-ship/> (дата обращения: 01.09.2018).
14. Расчетная программа CEAS Engine Calculations [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://marine.man-es.com/two-stroke/ceas> (дата обращения: 01.09.2018).
15. *Безюков О. К.* Современная концепция регулирования охлаждения судовых дизелей / О. К. Безюков, В. А. Жуков, В. Н. Тимофеев // *Вестник государственного университета морского и речного флота имени адмирала С.О. Макарова*. — 2015. — № 3 (31). — С. 93–103. DOI: 10.21821/2309-5180-2015-7-3-93-103.
16. *Гиттис В. Ю.* Теоретические основы эксплуатации судовых дизелей / В. Ю. Гиттис, В. Л. Бондаренко, Т. П. Ефимов. — М.: Транспорт, 1965. — 376 с.
17. Техническое описание и инструкция по эксплуатации. Дизели 6Ч(СП) 18/22, 6ЧН(СП) 18/22. — М.: Внешторгиздат. — Изд. № 883Н. — 80 с.
18. *Taskar B.* The effect of waves on engine-propeller dynamics and propulsion performance of ships / B. Taskar, K. K. Yum, S. Steen, E. Pedersen // *Ocean Engineering*. — 2016. — Vol. 122. — Pp. 262–277. DOI: 10.1016/j.oceaneng.2016.06.034.
19. *Иванченко А. А.* Проблемы эксплуатации судов с дизельными установками нового поколения и задачи по их совершенствованию / А. А. Иванченко, И. А. Щенников // *Вестник государственного университета морского и речного флота имени адмирала С.О. Макарова*. — 2014. — № 5 (27). — С. 26–33.
20. *Мясников Ю. Н.* Характеристики пропульсивного комплекса в проблеме обеспечения энергоэффективной и безопасной эксплуатации морского судна: монография / Ю. Н. Мясников, А. М. Никитин. — СПб.: Изд-во ГУМРФ им. адм. С. О. Макарова, 2016. — 136 с.
21. *Орехов С. Н.* Улучшение топливной экономичности судового двигателя на эксплуатационных режимах при увеличении максимального давления цикла / С. Н. Орехов, К. Ю. Перов // *Вестник Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана. Серия: Машиностроение*. — 2010. — № 1 (78). — С. 81–86.
22. *Осовский Д. И.* Исследование гидродинамических характеристик гребного винта, оборудованного струйной механизацией в гидродинамической трубе / Д. И. Осовский, А. С. Шаратов // *Рыбное хозяйство Украины: научно-производственный журнал*. — 2007. — № 6. — С. 37–38.
23. Пат. 46740 Украина, МПК В63Н 1/00. Конструкция механизированного гребного винта / Д. И. Осовский, А. С. Шаратов; заяв. и патентообл. Керченский государственный морской технологический университет. — № 200903725; заявл. 16.04.2009; опубл. 11.01.2010, Бюл. № 1. — 4 с.

REFERENCES

1. Ivanchenko, A., and Y. Tambovskii. “Improving the quality of design and operation of diesel vessel installations by introducing the mathematical modeling of their working process.” *Transport business of Russia* 5 (2017): 169–173.
2. *Mezhdunarodnaya Konventsia po predotvrashcheniyu zagryazneniya s sudov (MARPOL-73/78)*. Кн. III. SPb.: АО «TsNIIMF», 2017.
3. Zhao, F., W. Yang, W. W. Tan, W. Yu, J. Yang, and S. K. Chou. “Power management of vessel propulsion system for thrust efficiency and emissions mitigation.” *Applied Energy* 161.C (2016): 124–132. DOI: 10.1016/j.apenergy.2015.10.022.
4. Molland, A., S. Turnock, and D. Hudson. “Propeller Characteristics.” *Ship Resistance and Propulsion: Practical Estimation of Ship Propulsive Power*. Second edition. Cambridge: Cambridge University Press, 2017. 277–312. DOI:10.1017/9781316494196.014.
5. Dityatev, S.G. Issledovanie izmenenii vintovoi kharakteristiki sudovogo malooborotnogo dizelya v ekspluatatsii. PhD diss. L.: LVIMU im. adm. S.O. Makarova, 1984.
6. Voznitskii, I. V. *Dvigateli model'nogo ryada MC 50 – 98. Konstruktsiya, ekspluatatsiya i tekhnicheskoe obsluzhivanie*. M.: Morkniga, 2008.

7. S70MC Project guide. Web. 1 Sept. 2018 <<https://marine.man-es.com/applications/projectguides/2stroke/content/epub/>>.
8. Geertsma, R. W., R. R. Negenborn, K. Visser, M. A. Loonstijn, and J. J. Hopman. "Pitch control for ships with diesel mechanical and hybrid propulsion: Modelling, validation and performance quantification." *Applied Energy* 206 (2017): 1609–1631. DOI:10.1016/j.apenergy.2017.09.103.
9. Sharatov, A.S. "Struinoe vozdeistvie na dinamiku grebnogo vinta." *Visnik dvigunobuduvannya* 2 (2010): 82–85.
10. Carlton, J. S. "Propeller Performance Characteristics." *Marine Propellers and Propulsion*. Third edition. Butterworth-Heinemann: Elsevier Ltd., 2012. 79–136. DOI: 10.1016/B978-0-08-097123-0.00006-X.
11. Banawan, A. A., M. Mosleh, and I. S. Seddiek. "Prediction of the fuel saving and emissions reduction by decreasing speed of a catamaran." *Journal of Marine Engineering & Technology* 12.3 (2013): 40–48. DOI: 10.1080/20464177.2013.11020287
12. *Test result of shop trial, mitsui-m.a.n. B & W 7s70MC*. Mitsui engineering & shipbuilding Co ltd, 1995.
13. Basic Principles of Ship Propulsion. Web. 1 Sept. 2018 <<https://marine.man-es.com/propeller-aft-ship/>>.
14. CEAS Engine Calculations. Web. 1 Sept. 2018 <<https://marine.man-es.com/two-stroke/ceas/>>.
15. Bezyukov, O.K., V.A. Zhukov, and V.N. Timofeev. "Contemporary conception of regulation in cooling system of ship's diesel engines." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 3(31) (2015): 93–103. DOI: 10.21821/2309-5180-2015-7-3-93-103
16. Gittis, V.Yu., V.L. Bondarenko, and T.P. Efimov. *Teoreticheskie osnovy ekspluatatsii sudovykh dizelei*. M.: Transport, 1965.
17. *Tekhnicheskoe opisanie i instruktsiya po ekspluatatsii. Dizeli 6Ch(SP) 18/22, 6ChN(SP) 18/22*. Izd. № 883N. M.: Vneshtorgizdat.
18. Taskar, B, K. K. Yum, S. Steen, and E. Pedersen. "The effect of waves on engine-propeller dynamics and propulsion performance of ships." *Ocean Engineering* 122 (2016): 262–277. DOI: 10.1016/j.oceaneng.2016.06.034
19. Ivanchenko, A. A., and I. A. Schennikov. "Ship operating problems with the new generation of diesel engines and objectives for their improvement." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 5(27) (2014): 26–33.
20. Myasnikov, Yu.N., and A.M. Nikitin. *Kharakteristiki propul'sivnogo kompleksa v probleme obespecheniya energoeffektivnoi i bezopasnoi ekspluatatsii morskogo sudna: monografiya*. SPb.: Izd-vo GUMRF im. adm. S. O. Makarova, 2016.
21. Orekhov, S.N., and K.Yu. Perov. "Uluchshenie toplivnoi ekonomichnosti sudovogo dvigatelya na ekspluatatsionnykh rezhimakh pri uvelichenii maksimal'nogo davleniya tsikla." *Vestnik Moskovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. N.E. Baumana. Seriya: Mashinostroenie* 1(78) (2010): 81–86.
22. Osovskii, D.I., and A.S. Sharatov. "Issledovanie gidrodinamicheskikh kharakteristik grebnogo vinta, oborudovannogo struinoi mekhanizatsiei v gidrodinamicheskoi trube." *Rybnoe khozyaistvo Ukrainy: nauchno-proizvodstvennyi zhurnal* 6 (2007): 37–38.
23. Oowski, D.I., and A.S. Sharatov. UA46740U, IPC B63H 1/00. Konstruktsiya mekhanizirovannogo grebnogo vinta. Ukraine assignee. Publ. 1 Jan. 2010.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Шаратов Алексей Сергеевич — инженер-механик 1 категории
ФГБОУ ВО «Керченский государственный морской технологический университет»
298309, Российская Федерация,
Республика Крым, г. Керчь, ул. Орджоникидзе, 82
e-mail: seykgmtu@gmail.com

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Sharatov, Aleksei S. — Mechanical engineer of 1 category
Kerch State Maritime Technological University
82 Ordzhonikidze Str., Kerch,
298309, Republic of Crimea,
Russian Federation
e-mail: seykgmtu@gmail.com

Статья поступила в редакцию 17 сентября 2018 г.
Received: September 17, 2018.

ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ КОМПЛЕКСЫ И СИСТЕМЫ

DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-5-1075-1086

THE CONTROL OF THREE-PHASE VOLTAGE SOURCE INVERTER WITH THE THIRD HARMONIC PREMODULATION IN THE POWER SUPPLY OF DEEP-WATER VEHICLE

V. M. Rulevskiy, A. G. Yudintsev, V. A. Chekh

Research Institute of Automation and Electromechanics Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics, Tomsk, Russian Federation

This paper presents a power supply of an underwater vehicle with AC power transmission via a rope-cable. The module of a three-phase voltage source inverter provides the conversion of DC voltage to AC voltage of increased frequency so as to match the power of the energy source with the load power. The inverter modular design allows organizing the connection of different power load types of underwater vehicles. The operation algorithm of the three-phase voltage source inverter module is proposed. The algorithm takes into account the parameters of the cable line that affect the energy transmission to the underwater part of the power supply. Preliminary calculations of the modulation coefficients, including the different operation modes of the power supply, provides the formation of the output AC voltage of increased frequency with minimal dead time at the desired rate. The control method of power transistors is organized using SVPWM with the third harmonic injection. This method allows reducing the dynamic switching losses of power transistors and the harmonic distortion in the output voltage. Moreover, the third harmonic injection provides the increase in the output voltage value relative to the voltage of the DC power supply. For the correct choice of transistors, the ratios of static and dynamic losses are obtained. The value of these losses determines to a greater extent the duration of dead time. To confirm the algorithmic implementation, the circuit solutions of the onboard and underwater parts of the underwater vehicle power supply, as well as the module of the three-phase voltage source inverter are presented. The waveforms of the power transistors control signals for the inverter module are presented, which illustrate the sweep of the modulation coefficients in accordance with the SVPWM and the third harmonic injection.

Keywords: power supply, power transmission, rope-cable, alternating voltage, underwater vehicle, three-phase inverter, voltage source inverter, inverter control, space vector modulation, third harmonic injection, heat loss.

For citation:

Rulevskiy, Viktor M., Anton G. Yudintsev, and Vadim A. Chekh. "The control of three-phase voltage source inverter with the third harmonic premodulation in the power supply of deep-water vehicle." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova* 10.5 (2018): 1075–1086. DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-5-1075-108.

УДК 621.341.572

УПРАВЛЕНИЕ ТРЕХФАЗНЫМ АВТОНОМНЫМ ИНВЕРТОРОМ НАПРЯЖЕНИЯ С ПРЕДМОДУЛЯЦИЕЙ ТРЕТЬЕЙ ГАРМОНИКИ В СИСТЕМЕ ЭЛЕКТРОПИТАНИЯ ГЛУБОКОВОДНОГО АППАРАТА

В. М. Рудевский, А. Г. Юдинцев, В. А. Чех

ОП «НИИ АЭМ ТУСУР», Томск, Российская Федерация

В статье представлена система электропитания глубоководного аппарата с передачей энергии переменного тока по кабель-тросу. Функцию силового согласования источника энергии с нагрузкой осуществляет модуль трехфазного автономного инвертора, обеспечивающего преобразование постоянно-

го напряжения питания в переменное напряжение повышенной частоты. Модульное исполнение инвертора позволяет организовать подключение различных по мощности нагрузок для определенных типов глубоководных аппаратов. Предложен алгоритм управления модулем трехфазного автономного инвертора. В работе алгоритма исследуются параметры кабельной линии, оказывающие влияние на передачу энергии в подводную часть системы электропитания. Предварительные вычисления коэффициентов модуляции, учитывающих различные режимы работы системы электропитания, обеспечивают формирование выходного напряжения повышенной частоты при минимальных бестоковых паузах с необходимым быстродействием. Способ управления силовыми транзисторами организуется на основе векторной широтно-импульсной модуляции с введением третьей гармоники. Данный способ управления позволяет снизить динамические потери переключения силовых транзисторов и уровень высших гармоник в выходном напряжении. Также введение третьей гармоники обеспечивает увеличение значения выходного напряжения относительно напряжения источника питания постоянного тока. Для корректного выбора силовых транзисторов получены соотношения статических и динамических потерь. Величина данных потерь в значительной степени определяет длительность бестоковых пауз. Для подтверждения алгоритмической реализации представлены схемотехнические решения бортовой и подводной частей системы электропитания глубоководного аппарата, а также модуля трехфазного автономного инвертора напряжения. Приведены осциллограммы управления силовыми транзисторами модуля инвертора, иллюстрирующие развертку коэффициентов модуляции в соответствии с векторной широтно-импульсной модуляцией и введением третьей гармоники.

Ключевые слова: система электропитания, глубоководный аппарат, автономный инвертор напряжения, векторная широтно-импульсная модуляция, тепловые потери.

Для цитирования:

Рулевский В. М. Управление трехфазным автономным инвертором напряжения с предмодуляцией третьей гармоники в системе электропитания глубоководного аппарата / В. М. Рулевский, А. Г. Юдинцев, В. А. Чех // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2018. — Т. 10. — № 5. — С. 1075–1086. DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-5-1075-108.

Введение (Introduction)

В настоящее время для выполнения научных, поисковых, спасательных и других видов работ на дне Мирового океана необходимы современные глубоководные телеуправляемые необитаемые подводные аппараты, оснащенные различной научно-исследовательской и специальной аппаратурой. Для надежного функционирования телеуправляемых необитаемых подводных аппаратов (ТНПА) на предельных глубинах до 6000 м и более требуется высоконадежная система электропитания (СЭП), обеспечивающая необходимую стабилизацию выходного напряжения на нагрузке при высоких удельных характеристиках. Мощность таких систем может достигать несколько десятков киловатт. Выполнение требований, предъявляемых к СЭП глубоководных ТНПА, обеспечивается за счет передачи энергии по кабель-тросу на переменном трехфазном напряжении повышенной частоты [1]–[6].

Основным функциональным узлом СЭП глубоководного ТНПА с передачей энергии на переменном напряжении повышенной частоты является полупроводниковый автономный инвертор, алгоритм работы которого в значительной степени определяет энергетические параметры всей системы. Наиболее приемлемым способом управления транзисторными ключами автономного инвертора напряжения (АИН) для такой СЭП является векторная широтно-импульсная модуляция (ШИМ) с введением третьей гармоники [7]–[15].

Методы и материалы (Methods and Materials)

В качестве СЭП глубоководного аппарата рассмотрим систему с передачей энергии по кабель-тросу на переменном трехфазном напряжении повышенной частоты 1000 Гц (рис. 1) [6], которая состоит из шкафа питания (ШП), блока преобразователя (БП), блока коммутации (БК), пульта дистанционного управления (ПДУ), кабель-троса, СЭП гаража-заглубителя (ГЗ) и СЭП ТНПА.

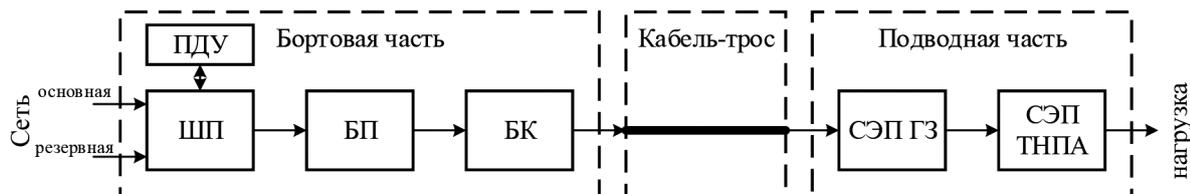


Рис. 1. Структурная схема СЭП ТНПА с передачей энергии по кабель-тросу на переменном трехфазном напряжении повышенной частоты 1000 Гц:

ПДУ — пульт дистанционного управления; ШП — шкаф питания; БП — блок преобразователя; БК — блок коммутации; СЭП ГЗ — система электропитания гаража-заглубителя; СЭП ТНПА — система электропитания телеуправляемого необитаемого подводного аппарата

Задачу формирования переменного напряжения повышенной частоты выполняет трехфазный АИН, который входит в состав БП СЭП. Структурная схема БП СЭП глубоководного аппарата приведена на рис. 2.

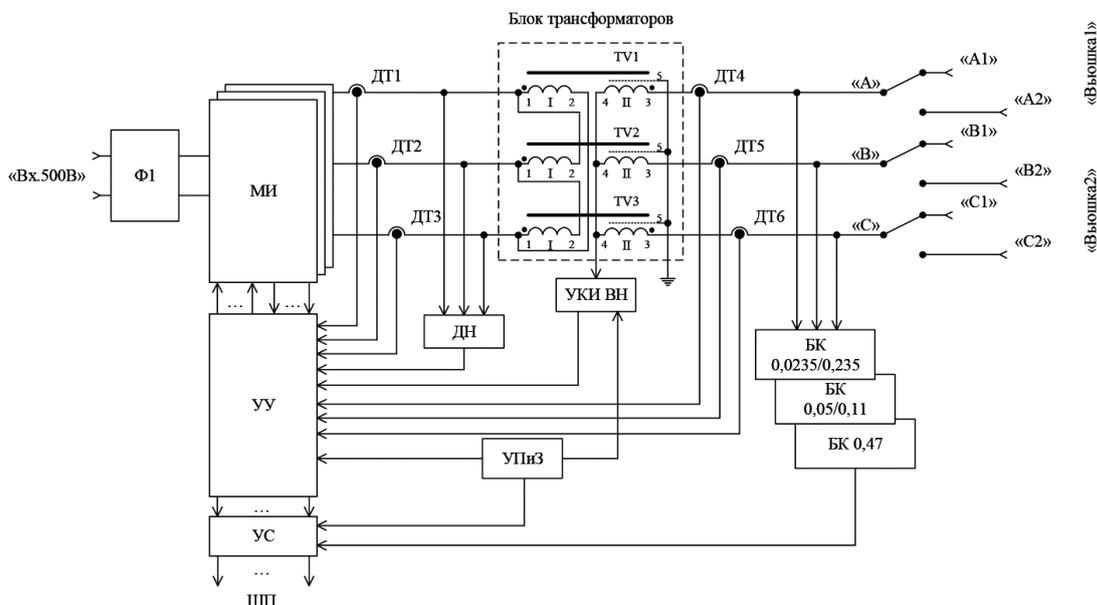


Рис. 2. Структурная схема блока преобразователя СЭП глубоководного аппарата:

Ф1 — входной фильтр; МИ — модуль инвертора; УУ — устройство управления; УС — устройство сопряжения; ДТ1 — ДТ6 — датчики тока; ДН — датчик напряжения; УКИ ВН — устройство контроля изоляции высокого напряжения; УПиЗ — устройство питания и защиты; БК 0,0235 – 0,47 — блоки компенсации

БП СЭП предназначена для формирования трехфазного напряжения 1500 В частотой 1000 Гц из постоянного выпрямленного напряжения, поступающего из вторичного источника питания. БП СЭП включает в себя: входной фильтр Ф1; устройство контроля изоляции высокого напряжения (УКИ ВН); модуль инвертора (МИ); блок компенсации (БК 0,0333); блок компенсации (БК 0,733); блок компенсации (БК 0,1567); блок компенсации (БК 0,667); устройство управления (УУ); устройство сопряжения (УС); устройство питания и защиты (УПиЗ); датчики тока ДТ1–ДТ6; датчик напряжения ДН; блок трансформаторов TV1–TV3.

БП СЭП работает следующим образом: постоянное напряжение поступает через входной фильтр Ф1 на три параллельно включенные контроллеры МИ. Каждый отдельно взятый модуль инвертора рассчитан на выходную мощность 10 кВт. Преобразованное трехфазное напряжение повышенной частоты (1 кГц) через повышающие трансформаторы и блок компенсации поступает на выходные клеммы для подачи напряжения в кабель-трос.

Модуль инвертора (рис. 3) содержит трехфазный АИН, усилитель мощности (УМ); контроллер МИ [0]; токоограничивающие дроссели $L1 - L3$; устройство управления и защиты (УУиЗ); входной $\Phi 1$ и выходной $\Phi 2$ фильтры; датчики тока ДТ1 – ДТ6.

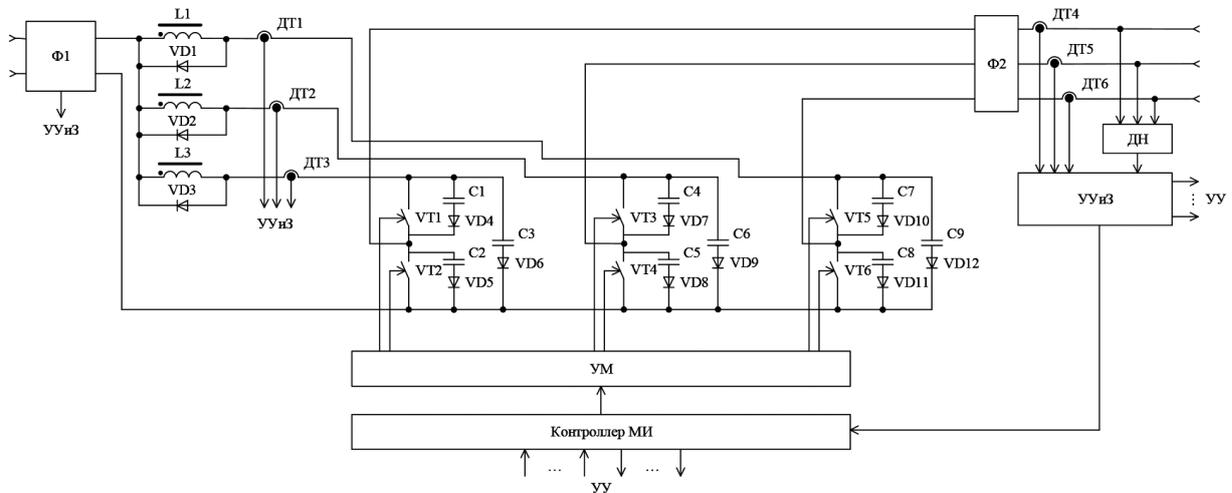


Рис. 3. Структурная схема модуля инвертора системы электропитания

Силовое питание 500 В в модуль инвертора МИ поступает от источника питания постоянно-го напряжения 500 В через входной фильтр $\Phi 1$ (см. рис. 2). В цепь силового питания МИ включены входные предохранители, которые расположены во входном фильтре $\Phi 1$ (см. рис. 3). Целостность предохранителей контролируется УУиЗ. Каждый силовой ключ и стойка АИН снабжены снабберными цепями.

На данный момент известны различные методы управления трехфазным автономным инвертором напряжения [8] – [12], но поскольку в подводной части СЭП глубоководного аппарата присутствует симметричная нагрузка (трехфазный выпрямительный мост), возможно применение метода управления инвертором, основанного на векторной ШИМ с добавлением третьей гармоники [13]–[15].

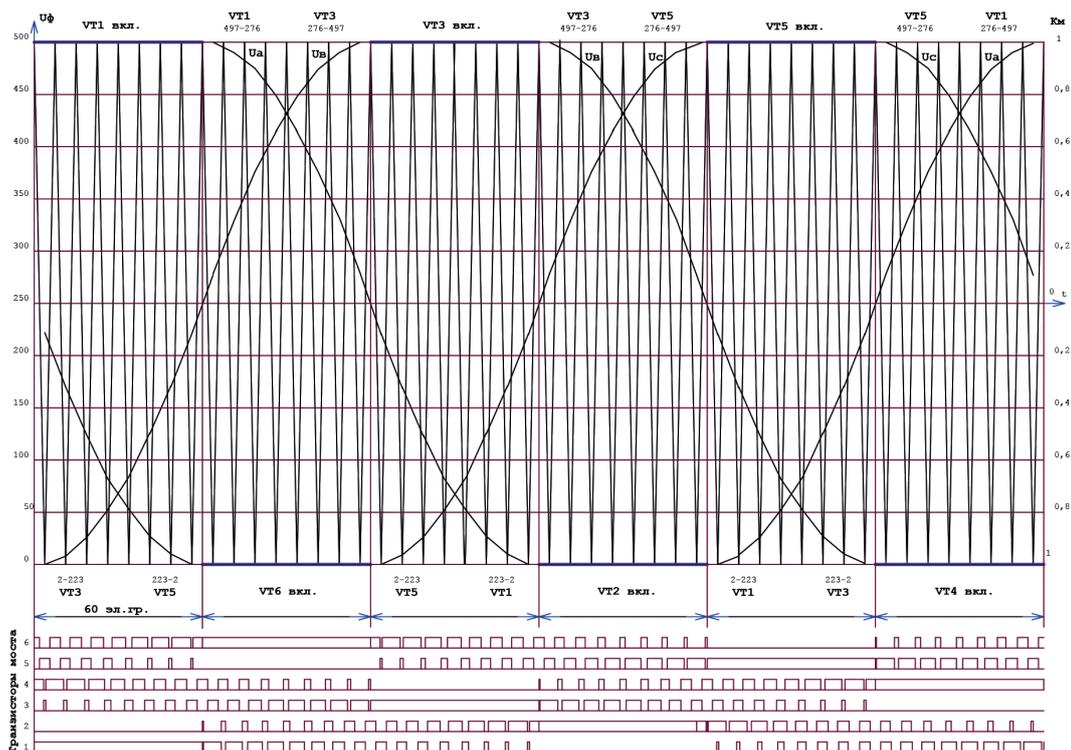


Рис. 4. Диаграмма управления транзисторами модуля инвертора

Для обозначения преимуществ данного метода рассмотрим временную диаграмму управления (рис. 4). Период работы каждой фазы транзисторного моста разбит на шесть интервалов ($\pi/3$), по 60 эл. град. В свою очередь, каждый 60°-й интервал разбит на восемь ШИМ-интервалов по 7,5 эл. град. Таким образом, модуляционное число ШИМ-преобразования составляет $M = 48$. При частоте $f_{\text{вых}}$ выходного напряжения АИН 1 кГц частота коммутации транзисторов будет определяться как $f_k = Mf_{\text{вых}} = 48$ кГц. Тогда длительность периода ШИМ $T_{\text{ШИМ}} = 1\text{мс} / 48 = 20,833$ мкс. ШИМ формируется сравнением сигнала линейной развертки с сигналом управления. В качестве сигнала двусторонней развертки на интервале 7,5 эл. град. принята «треугольная» цифровая развертка:

- на интервале от 0 до 3,75 эл. град. — от 0 до 500;
- на интервале от 3,75 до 7,5 эл. град. — от 500 до 0.

$N = 500$ — полное заполнение реверсивного счетчика развертки или цифрового генератора пилообразной развертки. Отсюда, если период генератора тактовых импульсов (ТИ) для цифровой пилы $T_{\text{ТИ}} = T_{\text{ШИМ}} / 2N = 20,833$ нс, то частота работы генератора цифровой развертки будет равна 48 МГц.

При векторной ШИМ дважды за период выходной частоты со сдвигом π в течение интервалов $\pi/3$ управление каждой фазы инвертора пассивно, т. е. коммутации силовых ключей с частотой ШИМ в ней не происходит. При этом открыт либо верхний, либо нижний фазный ключ в соответствии с алгоритмом управления. Другие две фазы с помощью ШИМ управляются разворотом длительности импульсов согласно функции синуса, предмодулированного третьей гармоникой.

Рассмотрим факторы, воздействующие на эквивалентный коэффициент заполнения $\gamma_{\text{эКВ}}$ векторной ШИМ с предмодуляцией третьей гармоники, равный отношению длительности импульса управления ключом ($t_{\text{и}}$) к межкоммутационному интервалу $T_{\text{ШИМ}}$. В идеальном случае

$$\gamma_{\text{эКВ}} = \frac{t_{\text{и}}}{T_{\text{ШИМ}}} = \frac{K_m A}{N}, \quad (1)$$

где K_m — коэффициент модуляции, или относительное выходное напряжение канального регулятора, преобразованное в цифровой код (отношение текущего кода АЦП к коду, соответствующему максимальному выходному напряжению регулятора).

В реальном инверторе коммутацию транзисторов в стойке (фазе) разделяют бестоковой паузой t_d , которую нужно преобразовать в цифровую форму T_d в размерности диапазона счета N реверсивного счетчика:

$$T_d = \frac{t_d \cdot N}{T_{\text{ШИМ}}} = \frac{1 \text{ мкс} \cdot 500}{20,833 \text{ мкс}} = 24.$$

Тогда в цифровой форме можно записать

$$\gamma_{\text{эКВ}} = \frac{t_{\text{и}}}{T_{\text{ШИМ}}} = \frac{K_m A - T_d}{N},$$

где A — табличные коэффициенты фазной развертки, рассчитываемые следующим образом:

- для возрастающего 60° интервала при открытом нижнем транзисторе:

$$A_{\text{в1}} = \frac{N}{2} + \left(\frac{N}{2} \cdot \frac{K_m}{\cos \frac{\pi}{6}} \right) \cdot \left[\sin \theta + \left(1 - \cos \frac{\pi}{6} \right) \cdot \sin 3\theta \right];$$

- для убывающего 60° интервала при открытом нижнем транзисторе:

$$A_{\text{в2}} = \frac{N}{2} + \left(\frac{N}{2} \cdot \frac{K_m}{\cos \frac{\pi}{6}} \right) \cdot \left[\sin \left(\theta + \frac{2\pi}{3} \right) + \left(1 - \cos \frac{\pi}{6} \right) \cdot \sin 3\theta \right];$$

- для возрастающего 60° интервала при открытом верхнем транзисторе:

$$A_{B2} = \frac{N}{2} + \left(\frac{N}{2} \cdot \frac{K_M}{\cos \frac{\pi}{6}} \right) \cdot \left[\sin \left(\theta - \frac{\pi}{3} \right) + \left(1 - \cos \frac{\pi}{6} \right) \cdot \sin 3\theta \right];$$

– для убывающего 60°-го интервала при открытом верхнем транзисторе:

$$A_{B2} = \frac{N}{2} + \left(\frac{N}{2} \cdot \frac{K_M}{\cos \frac{\pi}{6}} \right) \cdot \left[\sin(\theta + \pi) + \left(1 - \cos \frac{\pi}{6} \right) \cdot \sin 3\theta \right].$$

Из рис. 3 видно, что возрастающие и убывающие 60°-е интервалы образуют две 120°-е последовательности, содержащие по шестнадцать интервалов, внутри которых реверсивный счетчик достигает значения N и возвращается к нулевому значению. Тогда, согласно выражению (1), получим две последовательности для коэффициентов заполнения:

$$\gamma_1 = \frac{1}{2} + \left(\frac{K_M}{2 \cos \frac{\pi}{6}} \right) \left[\left(\sin \theta - \frac{\pi}{3} \right) - \left(1 - \cos \frac{\pi}{6} \right) \sin 3\theta \right];$$

$$\gamma_2 = \frac{1}{2} + \left(\frac{K_M}{2 \cos \frac{\pi}{6}} \right) \left[\sin \theta + \left(1 - \cos \frac{\pi}{6} \right) \sin 3\theta \right].$$

Подставляя θ с шагом 3,75°, покажем, что графические зависимости γ для шестнадцати интервалов имеют вид синусоидальной функции, предмодулированной третьей гармоникой (рис. 5).

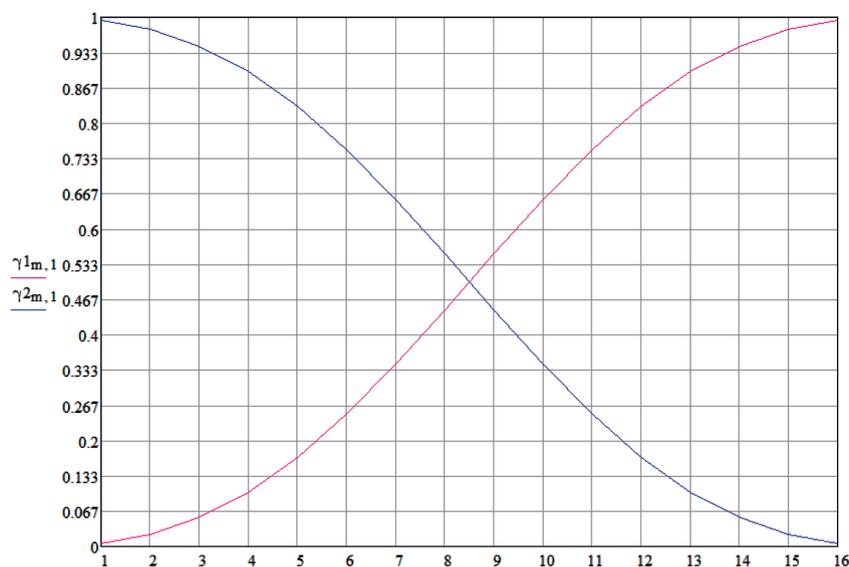


Рис. 5. Зависимости коэффициентов заполнения импульсов от порядкового номера интервала

Для обеспечения корректной работы АИН необходимо производить выбор силовых транзисторов с учетом статических и динамических потерь [16], [17], которые зависят от способа управления. Основополагающими параметрами выбора силового транзистора, работающего в ключевом режиме, являются максимальный ток, протекающий через транзистор в открытом состоянии, и напряжение, прикладываемое к нему в закрытом состоянии. При этом потери вычисляются с использованием действующей за период ШИМ величины тока. Также известно, что при выборе силового транзистора необходимо закладывать как минимум двойные коэффициенты запаса по току и напряжению.

Средний коэффициент заполнения за интервал $2\pi/3$ при $K_M = 1$

$$\gamma_{cp} = \frac{\sum_{n=1}^{16} \gamma_n}{16} = 0,5.$$

Так как каждый транзистор два интервала $2\pi/3$ работает в ключевом режиме (см. рис. 3) и один интервал $\pi/3$ — в режиме, в течение которого он полностью открыт, средний ток в транзисторе равен $1/3$ от тока, потребляемого по шине питания инвертора, при условии, что потребляемый ток абсолютно сглажен, имеем

$$I_{cp} = \frac{1}{3} I_d.$$

Полученное выражение позволяет оценить выбор транзистора с учетом среднего тока. При этом потери в транзисторе, работающем в ключевом режиме, состоят из потерь на проводимость в открытом состоянии (статических) и потерь на переключение (динамических). Для расчета потерь выбираем транзистор по рассчитанному среднему значению тока, определяем сопротивление канала в открытом состоянии (MOSFET) либо падение напряжения коллектор-эмиттер (IGBT) с учетом температурных характеристик, представленных в документации на полупроводниковый прибор. В статическом режиме для IGBT транзисторов имеем

$$P_{ст} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^{t_{on}} U_{ce}^2 I_d^2 dt} = U_{ce} I_d \sqrt{\frac{t_{on}}{T}} = U_{ce} I_d \sqrt{\gamma};$$

для MOSFET транзисторов имеем

$$P_{ст} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^{t_{on}} R_{ds\ on}^2 I_d^4 dt} = R_{ds\ on} I_d^2 \sqrt{\frac{t_{on}}{T}} = R_{ds\ on} I_d^2 \sqrt{\gamma},$$

где $P_{ст}$ — действующая величина статических потерь транзистора в открытом состоянии; T — период ШИМ; t_{on} — время открытого состояния транзистора; U_{ce} — напряжение на открытом транзисторе; I_d — ток транзистора в открытом состоянии, равный току в шине питания инвертора; $R_{ds\ on}$ — сопротивление канала MOSFET транзистора в открытом состоянии; γ — коэффициент заполнения.

С учетом того, что средняя за период величина $\gamma = 1/3$, выражения для статических потерь примут вид:

$$P_{ст} = \frac{U_{ce} I_d}{\sqrt{3}}; \quad P_{ст} = \frac{R_{ds\ on} I_d^2}{\sqrt{3}}.$$

Каждый транзистор мостового инвертора дважды за период основной гармоники напряжения находится в пассивном состоянии (полностью открыт, либо закрыт) в течение интервала $\pi/3$, т. е. в течение интервала $2\pi/3$ ($1/3$ от периода) в транзисторе не происходит коммутации с частотой ШИМ. В результате средняя за период ШИМ мощность потерь при включении транзистора:

$$P_{on} = \frac{1}{T} \int_0^{t_r} \left(1 - \frac{t}{t_r}\right) U_d \frac{I_d}{t_r} t = \frac{U_d I_d}{T t_r} \int_0^{t_r} \left(t - \frac{t^2}{t_r}\right) dt = \frac{U_d I_d t_r}{6T},$$

при выключении транзистора

$$P_{off} = \frac{1}{T} \int_0^{t_f} \left(1 - \frac{t}{t_f}\right) I_d \frac{U_d}{t_f} t = \frac{U_d I_d}{T t_f} \int_0^{t_f} \left(t - \frac{t^2}{t_f}\right) dt = \frac{U_d I_d t_f}{6T}.$$

Суммарная средняя мощность динамических потерь в транзисторе:

$$P_{дин} = \frac{U_d I_d}{6T} (t_r + t_f).$$

Ранее отмечалось, что при данном способе модуляции потери на переключение будут в 1,5 раза меньше. С учетом этого окончательное выражение для мощности динамических потерь будет иметь вид:

$$P_{дин} = \frac{U_d I_d}{9T} (t_r + t_f).$$

Параметры t_r и t_f берутся из паспортных данных на полупроводниковый прибор. Суммарные потери в транзисторе, работающем в классе D , при любом способе модуляции определяются как сумма статических и динамических потерь:

$$P_{\Sigma} = P_{\text{ст}} + P_{\text{дин}}$$

Результаты (Results)

Корректная работа БП, в состав которого входят силовые модули, обеспечивается алгоритмом управления трехфазным автономным инвертором, представленном на рис. 6. В алгоритм введены параметры кабельной линии, позволяющие учесть влияние её параметров на стабилизацию выходного напряжения АИН. На основе рассмотренного метода управления, а также параметров кабельной линии рассчитываются матрицы коэффициентов управления, которые, в свою очередь, пропорциональны коэффициенту модуляции силовых транзисторов АИН.

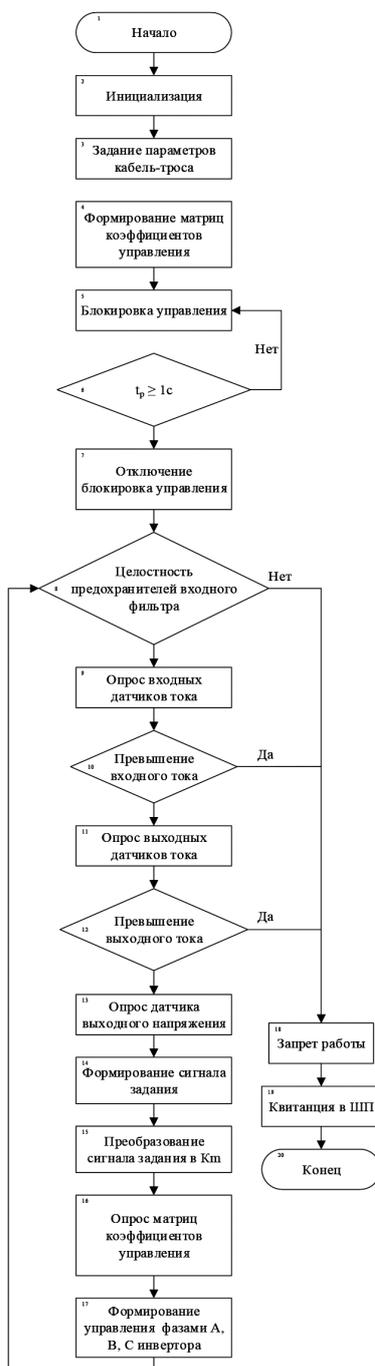


Рис. 6. Алгоритм работы системы управления трехфазный АИН

Телеметрические сигналы, используемые в системе электропитания, обеспечивают отслеживание энергетических показателей подводной части, а также применяются в формировании контуров защит электропитания глубоководного аппарата.

Применение комбинированного способа управления обусловлено текущими возможностями технической реализации, позволяющими достичь максимального быстродействия системы при заданных выходных параметрах. Вышеуказанные расчеты и алгоритмы реализованы в системах электропитания с передачей энергии по кабель-тросу на переменном токе повышенной частоты. В качестве подтверждения на рис. 7 приведен модуль инвертора, а на рис. 8 — осциллограммы напряжения управления силовыми транзисторами АИН.

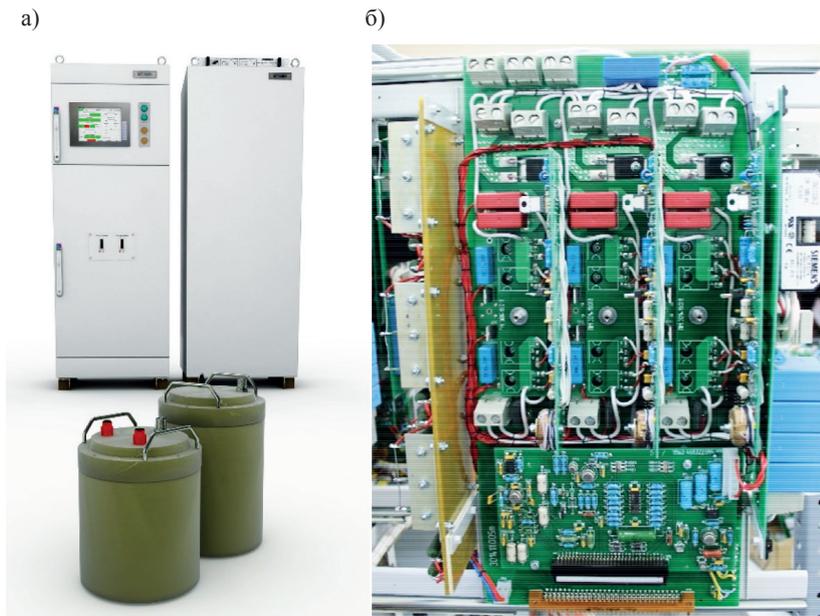


Рис. 7. Система электропитания глубоководного аппарата (а) и модуль инвертора (б)

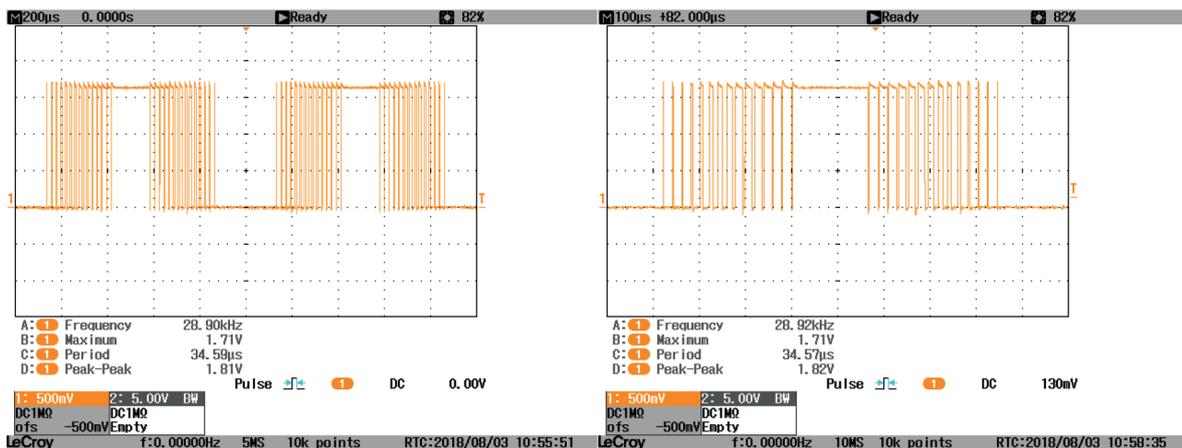


Рис. 8. Осциллограммы напряжения управления силовыми ключами трехфазного автономного инвертора

Обсуждение (Discussion)

Благодаря применению векторной ШИМ с предмодуляцией третьей гармоники, средняя частота коммутации каждого силового ключа в 1,5 раза ниже по сравнению с классической ШИМ, что, соответственно, снижает динамические потери. При условии, что задающие фазные ШИМ

сигналы соответствуют основной гармонике фазного выходного напряжения АИН, в системе «неуправляемый сетевой выпрямитель – АИН» выходное напряжение не превышает 0,827 напряжения сети. Задача повышения отношения основной гармоники выходного напряжения АИН к напряжению питания может быть решена только одним путем — использованием несинусоидального закона изменения фазных заданий, например, прямоугольного или трапецеидального, но это ведет к ухудшению гармонического состава фазных и линейных выходных напряжений АИН, прежде всего, из-за 5, 7, 11 и 13-й гармоник. Гармоники, кратные трем, являются гармониками нулевой последовательности и при симметричной нагрузке не содержатся в фазных и линейных напряжениях нагрузки. В рассматриваемой системе подводная часть содержит мостовые трехфазные выпрямители, т. е. нагрузка — симметричная.

Таким образом, применение несинусоидального закона для модуляции длительности импульсов потенциалов фаз φ_A , φ_B и φ_C обеспечивает отсутствие в низкочастотной части спектра фазных и линейных напряжений инвертора гармоник искажения. Данный способ обеспечивает увеличение амплитуды основной гармоники, при этом в спектре ШИМ-последовательностей: φ_A , φ_B и φ_C , помимо основной гармоники содержатся только гармоники нулевой последовательности, т. е. гармоники, кратные трем.

Применение способа предмодуляции третьей гармоникой не только увеличивает максимально достижимое отношение амплитуды первой гармоники выходного напряжения U_{m1} к напряжению источника питания $U_{пит}$ на 15,47 %, но и приводит к заметному снижению содержания высших гармоник. Данное явление объясняется тем, что при равном единице коэффициенте модуляции K_m в ШИМ с предмодуляцией амплитуда основной гармоники на 15,47 % выше, чем в инверторе с классической трехфазной ШИМ.

Выводы (Summary)

В результате проведенного исследования можно сделать следующие выводы:

1. Применение векторной ШИМ с предмодуляцией третьей гармоникой позволяет снизить динамические потери в АИН за счет снижения частоты коммутации силовых ключей в 1,5 раза, приводит к снижению действующих значений высших гармоник, увеличивает отношение выходного напряжения АИН к источнику питания на 15,47 %, исключает влияние гармоник нулевой последовательности при условии симметричной нагрузки.
2. Разработанный алгоритм управления обеспечивает корректную работу системы электропитания с передачей энергии переменного тока по кабель-тросу, а также позволяет производить работу с глубоководными аппаратами различной мощности за счёт модульного исполнения автономного инвертора напряжения.

*Авторы выражают глубокую признательность **В. Н. Мишину** и **В. А. Пчельникову** за существенную поддержку и постоянное внимание к работе, что позволило достичь авторам настоящего исследования первых научных успехов.*

Работа выполнена в рамках проекта 8.8184.2017/8.9 «Методология создания систем энергогенерирующих и энергопреобразующих устройств для наземных и бортовых комплексов наземного, космического и подводного базирования».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Войтов Д. В.* Телеуправляемые подводные аппарата / Д. В. Войтов. — М.: Моркнига, 2012. — 504 с.
2. *Albitar H.* Underwater robotics: surface cleaning technics, adhesion and locomotion systems / H. Albitar, K. Dandan, A. Ananiev, I. Kalaykov // International Journal of Advanced Robotic System. — 2015. — Vol. 13. — Is. 1. — Pp. 1–14. DOI: 10.5772/62060.
3. *Заслонов В. В.* Развитие глубоководной роботизированной техники. История вопроса / В. В. Заслонов, Н. А. Кравченко // Молодой ученый. — 2016. — № 7 (111). — С. 85–88.

4. Занин В. Ю. Использование телеуправляемых подводных аппаратов со специализированных и неспециализированных плавсредств / В. Ю. Занин // Известия ЮФУ. Технические науки. — 2010. — № 3 (104). — С. 179–186.

5. Рулевский В. М. Системы электропитания телеуправляемых подводных аппаратов / В. М. Рулевский, Ю. Н. Дементьев, О. В. Бубнов // Известия Томского политехнического университета. — 2004. — Т. 307. — № 5. — С. 120–123.

6. Мишин В. Н. Системы электропитания телеуправляемых подводных аппаратов переменного тока мощностью свыше 10 кВт / В. Н. Мишин, В. М. Рулевский, А. Г. Юдинцев // Там же. — 2013. — Т. 322. — № 4. — С. 107–110.

7. Пат. 117747 Российская Федерация, МПК Н02М 7/00. Устройство для управления трёхфазным автономным инвертором с помощью векторной ШИМ / В. Н. Мишин, В. А. Пчельников, В. М. Рулевский, А. Г. Юдинцев, В. Л. Иванов; патентообл.: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники. — № 2011152344/07; заявл. 21.12.2011; опубл. 27.06.2012, Бюл. № 18. — 15 с.

8. Мелешин В. И. Управление транзисторными преобразователями электроэнергии / В. И. Мелешин, Д. А. Овчинников. — М.: Техносфера, 2011. — 576 с.

9. Белоусов И. В. Сравнительный анализ методов широтно-импульсной модуляции / И. В. Белоусов, В. Ф. Самосейко, Л. М. Бровчинова // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2018. — Т. 10. — № 2. — С. 420–429. DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-2420-429.

10. Чубуков К. А. Исследование и разработка вариантов широтно-импульсной модуляции в трехфазных автономных инверторах с двигательной нагрузкой: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.09.12 / К. А. Чубуков. — Чебоксары, 2010. — 23 с.

11. Чаплыгин Е. Е. Способ управления автономным инвертором напряжения с векторной ШИМ / Е. Е. Чаплыгин, С. В. Хухтиков // Практическая силовая электроника. — 2010. — № 3 (39). — С. 40–43.

12. Брусниловский Б. В. О возможностях улучшения гармонического состава напряжения на выходе автономного инвертора напряжения с широтноимпульсной модуляцией / Б. В. Брусниловский, Н. А. Добролюбов // Морской вестник. — 2018. — № 2 (11). — С. 72–77.

13. Чаплыгин Е. Е. Спектральное моделирование преобразователей с широтно-импульсной модуляцией: учеб. пособие по курсу «Моделирование электронных устройств и систем» / Е. Е. Чаплыгин. — М.: Изд-во МЭИ, 2009. — 56 с.

14. Rulevskiy V. M. Autonomous inverters' PWM methods for remotely controlled unmanned underwater vehicles / V. M. Rulevskiy, A. A. Pravikova, D. Yu. Lyapunov // Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM), International Conference on. — IEEE, 2016. — Pp. 1–4. DOI: 10.1109/ICIEAM.2016.7911641.

15. Jose J. Improved inverter utilisation using third harmonic injection / J. Jose, G. N. Goyal, M. V. Aware // Power Electronics, Drives and Energy Systems (PEDES) & 2010 Power India, 2010 Joint International Conference on. — IEEE, 2010. — Pp. 1–6. DOI: 10.1109/PEDES.2010.5712490.

16. Дыбко М. А. Методика расчёта динамических потерь мощности в полупроводниковых преобразователях на транзисторах типа mosfet с векторным способом управления / М. А. Дыбко, Е. В. Гришанов, С. В. Брованов, В. Г. Токарев // Доклады Академии наук высшей школы Российской Федерации. — 2017. — № 3 (63). — С. 52–63. DOI: 10.17212/1727-2769-2017-3-52-63.

17. Graovac D. MOSFET power losses calculation using the data-sheet parameters. Application Note / D. Graovac, M. Purschel, A. Kier. — Neubiberg, Germany: Infineon Technologies AG, 2006. — Vol. 1.1. — 23 p.

REFERENCES

1. Voitov, D. V. *Telepravlyaemye podvodnye apparata*. M.: Morkniga, 2012.
2. Albitar, H., K. Dandan, A. Ananiev, and I. Kalaykov. "Underwater robotics: surface cleaning technics, adhesion and locomotion systems." *International Journal of Advanced Robotic Systems* 13.1 (2016): 1–14. DOI: 10.5772/62060.
3. Zaslunov, V. V., and N. A. Kravchenko. "Razvitie glubokovodnoi robotizirovannoi tekhniki. Istoriya voprosa." *Molodoi uchenyi* 7(111) (2016): 85–88.
4. Zanim, Vladislav Yurevich. "Using a underwater remote operating vehicle (ROV) with specialized and non-specialized ships." *Izvestiya SFedU. Engineering sciences* 3(104) (2010): 179–186.
5. Rulevskii, V. M., Yu. N. Dement'ev, and O. V. Bubnov. "Sistemy elektropitaniya telepravlyaemykh podvodnykh apparatov." *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta* 307.5 (2004): 120–123.

6. Mishin, V. N., V. M. Rulevskii, and A. G. Yudintsev. "Sistemy elektropitaniya teleupravlyaemykh podvodnykh apparatov pere-mennogo toka moshchnost'yu svyshe 10 kVt." *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta* 322.4 (2013): 107–110.
7. Mishin, V. N., V. A. Pchel'nikov, V. M. Rulevskii, A. G. Yudintsev, and V. L. Ivanov. RU 117 747 U1, IPC H 02 M 7/00. Ustroistvo dlya upravleniya trekhfaznym avtonomnym invertorom s pomoshch'yu vektornoj ShIM. Russian Federation, assignee. Publ. 27 June 2012.
8. Meleshin, V. I., and D. A. Ovchinnikov. *Upravlenie tranzistornymi preobrazovatelyami elektroenergii*. M.: Tekhnosfera, 2011.
9. Belousov, Igor V., Veniamin F. Samosejko, and Ludmila M. Brovtsinova. "Comparative analysis of the pulse width modulation methods." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova* 10.2 (2018): 420–429. DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-2-420-429.
10. Chubukov, K. A. Issledovanie i razrabotka variantov shirotno-impul'snoi modulyatsii v trekhfaznykh avtonomnykh invertorakh s dvigatel'noi nagruzkoj. Abstract of PhD diss. Cheboksary, 2010.
11. Chaplygin, Evgeniy, and Sergei Khukhtikov. "Control Method For Self-Commutated Voltage Inverter With Vector PWM." *Practical Power Electronics* 3(39) (2010): 40–43.
12. Brusnilovskii, B. V., and N. A. Dobroskok. "O vozmozhnostyakh uluchsheniya garmonicheskogo sostava napryazheniya na vykhode avtonomnogo invertora napryazheniya s shirotnoimpul'snoi modulyatsiei." *Morskoi vestnik* 2(11) (2018): 72–77.
13. Chaplygin, E. E. *Spektral'noe modelirovanie preobrazovatelei s shirotno-impul'snoi modulyatsiei: uchebnoe posobie po kursu «Modelirovanie elektronnykh ustroystv i sisitem»*. M.: Izd-vo MEI, 2009.
14. Rulevskiy, V. M., A.A. Pravikova, and D. Yu. Lyapunov. "Autonomous inverters' PWM methods for remotely controlled unmanned underwater vehicles." *Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM), International Conference on*. IEEE, 2016. DOI: 10.1109/ICIEAM.2016.7911641
15. Jose, Joby, G. N. Goyal, and M. V. Aware. "Improved inverter utilisation using third harmonic injection." *Power Electronics, Drives and Energy Systems (PEDES) & 2010 Power India, 2010 Joint International Conference on*. IEEE, 2010. DOI: 10.1109/PEDES.2010.5712490
16. Dybko, M. A., E. V. Grishanov, S. V. Brovanov, and V. G. Tokarev. "A technique for switching power loss calculation in MOSFET semiconductor power converters with PWM control." *Proceedings of the Russian Higher School Academy of Sciences* 3(36) (2017): 52–63.
17. Graovac, Dusan, Marco Purschel, and Andreas Kiep. *MOSFET power losses calculation using the data-sheet parameters. Application Note*. Vol. 1.1. Neubiberg, Germany: Infineon Technologies AG, 2006.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Рулевский Виктор Михайлович —
кандидат технических наук
ОП «НИИ АЭМ ТУСУР»
634034, Российская Федерация, г. Томск,
ул. Белинского 53
e-mail: rulevsky@niiuem.tomsk.ru

Юдинцев Антон Геннадьевич —
кандидат технических наук
ОП «НИИ АЭМ ТУСУР»
634034, Российская Федерация, г. Томск, ул.
Белинского 53
e-mail: yudintsev-anton@mail.ru

Чех Вадим Андреевич —
аспирант, младший научный сотрудник
Научный руководитель:
Рулевский Виктор Михайлович
ОП «НИИ АЭМ ТУСУР»
634034, Российская Федерация, г. Томск, ул.
Белинского 53
e-mail: chekh1993@gmail.com

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Rulevskiy, Viktor M. — PhD
Research Institute of Automation and
Electromechanics Tomsk State University
of Control Systems and Radioelectronics
53, Belinsky Str., Tomsk, 634034, Russian Federation
e-mail: rulevsky@niiuem.tomsk.ru

Yudintsev, Anton G. — PhD
Research Institute of Automation and
Electromechanics Tomsk State University
of Control Systems and Radioelectronics
53, Belinsky Str., Tomsk, 634034, Russian Federation
e-mail: yudintsev-anton@mail.ru

Chekh, Vadim A. —
Postgraduate, junior research scientist
Supervisor: Rulevskiy, Viktor M.
Research Institute of Automation and
Electromechanics Tomsk State University
of Control Systems and Radioelectronics
53, Belinsky Str., Tomsk, 634034, Russian Federation
e-mail: chekh1993@gmail.com

Статья поступила в редакцию 24 августа 2018 г.
Received: August 24, 2018.

DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-5-1087-1093

COMPARATIVE ANALYSIS OF S, X, K_a FREQUENCY SHIP'S RADARS

A. P. Gorobtsov, A. N. Marinich, Y. M. Ustinov

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

The article is devoted to comparative analysis of ship's radars designed for the S and X band. In addition, an assessment was effected of the prevalence of radars transmitting in the Ka band. Ka-radars are generally used for ship ice operations, on-shore infrastructure of vessel traffic management systems, security of ports and terminals, and for research. The task of selecting shipborne radar stations is relevant for shipowners in the process of acquiring new ships or updating the ship's navigation equipment. The capabilities of shipborne radars can be to a certain extent adapted to the conditions of the radar observation of the ship's navigation areas. This is primarily applicable to vessels designed to operate in specific navigation areas, for example, icebreakers.

Radar analysis shown that S-radars have greater target detection range, more powerful transmitter and larger size of antennae for the equivalent polar diagrams. Length of antennae is proportional to wavelength of appropriate frequency. Proportion between the target detection range and output power of transmitter for existing radars does not neatly conform the main radar equation. It is evident due to attenuation of signal power in conformity to wavelength in the Earth Standard Atmosphere and weather conditions, and influence of radar waves refraction (propagation conditions) are not taken into account. Regarding Ka-radar it needed to note that trials are still in force now. The decision about a ship to be equipped with Ka-radar can be accepted after additional tests with shorter duration of impulses and increase in demand for ship operations in ice conditions.

Keywords: S-radar, X-radar, Ka-radar, radar detection range, output power of transmitter, size of antennae, influence of meteorological conditions, radio wave refraction.

For citation:

Gorobtsov, Alexander P., Alexander N. Marinich, and Yury M. Ustinov. "Comparative analysis of S, X, Ka frequency ship's radars." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova* 10.5 (2018): 1087–1093. DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-5-1087-1093.

УДК 629.052.3, 629.058

СОПОСТАВЛЕНИЕ СУДОВЫХ РАДАРОВ, РАБОТАЮЩИХ В S-, X-, K_a -ДИАПАЗОНАХ

А. П. Горобцов, А. Н. Маринич, Ю. М. Устинов

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

В статье проводится сравнительный анализ судовых радиолокационных станций (РЛС), работающих в S- и X-диапазонах. Кроме того, дана оценка распространенности РЛС, излучающих в K_a -диапазоне, которые используются при работе судов во льдах, на береговых объектах управления движением судов (для защиты портов и терминалов), а также в исследовательских разработках. Задача выбора судовых радиолокационных станций актуальна для судовладельцев при оснащении новых судов или обновлении навигационного оборудования судна. Возможности судовых РЛС могут быть в определенной степени адаптированы к условиям радиолокационного наблюдения районов плавания судна. В первую очередь это применимо к судам, спроектированным для работы в конкретных районах плавания, например, к ледоколам.

Из сопоставления РЛС следует, что S-радары имеют большую дальность обнаружения целей, большую мощность передатчиков и большие размеры антенн при одинаковой их направленности. Длины антенн пропорциональны длине волны используемых диапазонов частот. Показано, что соотношение между дальностью обнаружения целей и выходной мощностью эксплуатируемых РЛС не соответствует основному уравнению радиолокации, так как в уравнении не учитываются ослабление мощности зондирующих сигналов в стандартной атмосфере Земли и при различных погодных условиях, а также изменение дальности в условиях рефракции радиоволн. Для повышения эффективности радиолокационного наблюдения

предлагается размещать на судах K_a -радары, находящиеся в опытной эксплуатации, после дополнительных испытаний с меньшей длительностью зондирующих импульсов при условии повышения спроса на работу судов в ледовых условиях.

Ключевые слова: S-радар, X-радар, K_a -радар, дальность обнаружения цели, выходная мощность передатчика, длина антенны, влияние погодных условий, рефракция радиоволн.

Для цитирования:

Горобцов А. П. Сопоставление судовых радаров, работающих в S-, X-, K_a -диапазонах / А. П. Горобцов, А. Н. Маринич, Ю. М. Устинов // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2018. — Т. 10. — № 5. — С. 1087–1093. DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-5-1087-1093.

Введение (Introduction)

В соответствии с Резолюцией А.477 (XII) ИМО все судовые радары должны при нормальных условиях рефракции радиоволн обеспечивать четкую индикацию следующих объектов:

- береговой черты при высоте берега 60 м на расстоянии 20 морских миль и при высоте берега 6 м — на удалении семи морских миль;
- судов вместимостью 5000 на удалении семи морских миль и судов с вместимостью 200 — на удалении двух морских миль.

В судовой радиолокации, в отличие от систем спутниковой связи, уже в течение нескольких лет параллельно развиваются, конкурируя друг с другом, три направления разработки РЛС [1]–[4]:

- S-радары, работающие в диапазоне 3 ГГц;
- X-радары, работающие в диапазоне 9 ГГц;
- K_a -радары, работающие в диапазоне 33 ГГц.

Судовые S- и X-радары многих типов выпускаются в России и за рубежом. Среди отечественных радаров широкую известность получили РЛС типа «Галс», «Лиман», «Наяда», «Океан», «Ряд», «Обзор» и др. Среди зарубежных фирм, выпускающих радары, наиболее известными являются: FURUNO, JRC, KODEN, SI-TEX (Япония), SIMRAD/ANRITSU (Норвегия), Litton Marine Systems (Великобритания).

Задача выбора судовых радиолокационных станций, соответствующих особенностям района плавания судна, является, в первую очередь, актуальной для судов специального назначения: ледоколов, исследовательских судов, а также судов обеспечения морских операций на шельфе. Создание «автономных» или «безэкипажных» судов, на которых отсутствуют члены экипажа, также формирует новый вызов для радиолокационной техники, выбора оптимальных диапазонов ее работы, размещения антенн или сенсоров на судне и т. д. Для решения задачи выбора РЛС необходимо выполнить объективное сопоставление судовых радаров.

В современных судовых РЛС приемопередатчик совместно с антенной устанавливаются на специальной площадке судовой мачты [5]. Приемопередатчик в герметичном кожухе устройства сканирования размещается непосредственно под антенной. При таком размещении волноводный тракт сокращается до минимума, потери мощности значительно сокращаются. При наличии антенно-волноводного тракта от антенны до приемопередатчика внутри судна потери составляют до 50 %. Качество герметизации и надежность элементов позволяют создавать приемопередатчики, которые в течение нескольких лет работают без ремонта и обслуживания.

Трехсантиметровые X-радары входят в состав обязательного оборудования для судов валовой вместимостью более 300, на суда с вместимостью более 3000 должны устанавливаться две РЛС, одна из которых может быть S-радаром. K_a -радары (длина волны 0,9 см) находятся в опытной эксплуатации и в настоящее время на судах широко не применяются [5], [6].

Методы и материалы (Methods and Materials)

Из сопоставления характеристик выпускаемых типов S- и X-радаров можно сделать следующий вывод: S-радары имеют большую выходную мощность, большую дальность обнаружения целей и большие размеры антенн. По рекомендациям ИМО, допустимая ширина диаграммы на-

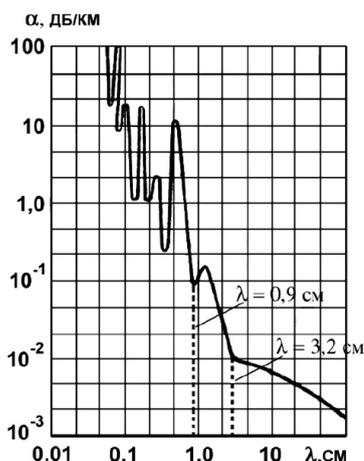


Рис. 1. Зависимость погонного затухания сигнала α в атмосфере Земли при нормальных погодных условиях от длины волны λ

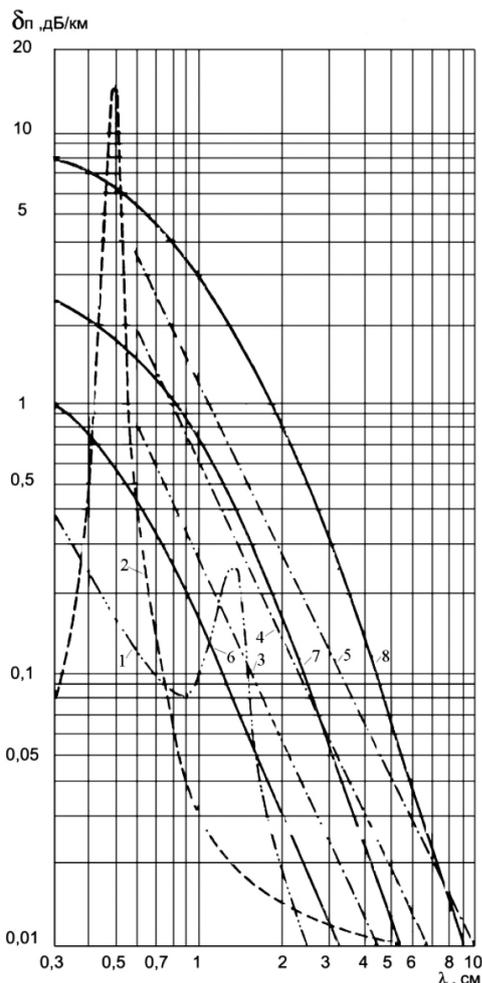


Рис. 2. Ослабление сигнала в атмосфере Земли при различных погодных условиях:

- 1 — водяной пар; 2 — кислород; 3 — туман (видимость 150 м); 4 — туман (видимость 60 м); 5 — туман (видимость 30 м); 6 — слабый дождь (1 мм/ч); 7 — средний дождь (4 мм/ч); 8 — сильный дождь (16 мм/ч)

правленности судовой антенны по горизонтали не должна превышать 2° , а по вертикали должна быть не менее 20° . Для S -радаров (длина волны 9,8 см) такие характеристики обеспечивает апертура антенны длиной 2,8 м и шириной 0,28 м. Для X -радаров длина апертуры антенны в три раза меньше и составляет 0,9 м, для K_a -радаров — 0,3 м. Коэффициент усиления таких антенн в S -, X - и K_a -диапазонах при КПД = 0,7 одинаков и равен 700.

На основании основного уравнения радиолокации расчетная формула для дальности обнаружения цели D (в свободном пространстве) имеет вид [2]:

$$D = \sqrt[4]{\frac{P_u G S_{\text{эф}} S_a}{16\pi^2 m P_{\text{пр min}}}}$$

где P_u — выходная мощность передатчика; G — коэффициент усиления антенны; $S_{\text{эф}}$ — эффективная площадь рассеяния цели; S_a — площадь апертуры антенны; $m = 10$; $P_{\text{пр min}}$ — чувствительность приемника.

Из приведенного уравнения следует, что уменьшение дальности обнаружения цели в два раза происходит при уменьшении выходной мощности в 16 раз, а если условия эксплуатации позволяют уменьшить искомую дальность в три раза, то выходная мощность может быть уменьшена в 81 раз. В основном уравнении для свободного пространства отсутствует зависимость дальности обнаружения целей в атмосфере Земли от длины волны. На рис. 1 показана зависимость погонного затухания α мощности сигнала в атмосфере Земли при нормальных погодных условиях от длины волны λ .

Соотношение между разной выходной мощностью и максимальной дальностью не соответствует основному уравнению радиолокации, так как дальность меняется в условиях земной атмосферы и при различных видах рефракции. Сложные погодные условия приводят к уменьшению дальности и, напротив, некоторые виды рефракции — к значительному увеличению дальности [7]–[12]. На рис. 2 приведены графики погонного удельного ослабления сигнала в атмосфере Земли при различных погодных условиях для различных длин волн.

На рис. 3 показано, как меняется дальность обнаружения цели $D_{\text{max атм}}$ при различных δ_n

по сравнению с дальностью D_{\max} в стандартной атмосфере. Графики построены для случая, когда на всей трассе распространения сигнала РЛС условия одинаковы.

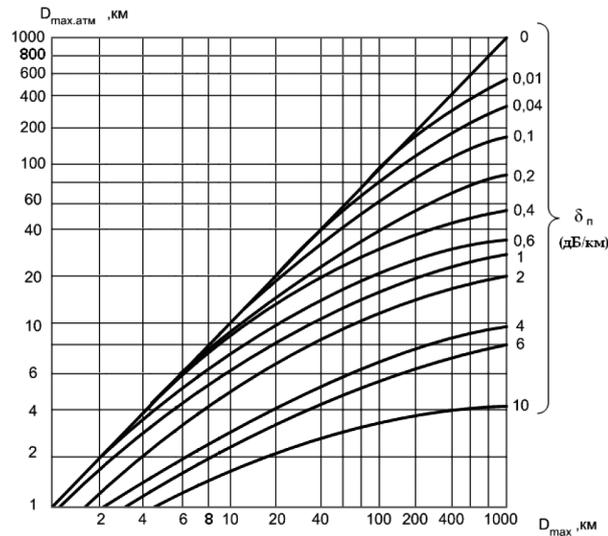


Рис. 3. Соотношение между дальностями обнаружения цели в сложных и нормальных погодных условиях в зависимости от погонного затухания сигналов в атмосфере Земли на всей длине трассы

Из рис. 3 следует, что при сильном дожде при $\lambda = 10$ см величина $\delta_n = 0$, поэтому дальность обнаружения цели не меняется. Для $\lambda = 3$ см величина $\delta_n = 0,3$ дБ/км. Дальность обнаружения цели не меняется, если $D_{\max} < 8$ км. Если $D_{\max} = 200$ км, то, из-за дождя, дальность уменьшается до 50 км.

На условия прохождения зондирующих сигналов РЛС в атмосфере Земли оказывает существенное влияние рефракция сигналов. Различают четыре вида рефракции: субрефракция, стандартная рефракция, суперрефракция и сверхрефракция. Среди них «наихудшей» является субрефракция, которая возникает в полярных широтах вблизи береговой черты, когда температура водной поверхности превышает температуру нижних слоев воздуха. Явление субрефракции возникает неожиданно и может привести к аварийной ситуации, так как цели, хорошо видимые ранее, пропадают с экранов РЛС. При субрефракции траектория луча искривляется вверх и может проходить выше ранее видимых целей. Явление субрефракции проявляется независимо от длины волны зондирующих сигналов. На рис. 4 приведены области различных видов рефракции, величины изменения дальности обнаружения целей указаны в источнике [2].



Рис. 4. Области субрефракции, стандартной рефракции, суперрефракции и сверхрефракции в зависимости от изменения показателя преломления n с высотой h в нижних слоях атмосферы Земли

Результаты (Results)

Возможность применения судовых РЛС в K_a -диапазоне определяется по результатам опытной эксплуатации K_a -радаров. K_a -радар имеет выходную мощность 8 кВт, коэффициент усиления антенны — 7000, длину антенны — 2,5 м, максимальную дальность обнаружения целей при различных погодных условиях — 6–24 км, длительность импульсов — 0,05–0,2 мкс [2], [13], [14]. Характеристика радара существенно меняется в зависимости от длительности зондирующих импульсов, так как при их уменьшении возрастает разрешающая способность по дальности и появляется возможность различать фрагменты цели по «сырому изображению» цели на экране индикатора. Кроме того, при малой длительности импульсов уменьшаются дисперсные помехи от гидрометеоров и взволнованной морской поверхности.

Возможность изменения длительности импульсов в широких пределах в K_a -радаров не реализована, кроме того, K_a -радары имеют низкую надежность, так как необходимым является размещение двух комплектов приемопередатчиков в устройстве сканирования.

Обсуждение (Discussion)

При сопоставлении РЛС S -, X - и K_a -диапазонов следует учитывать, что дальность обнаружения целей в атмосфере Земли при одинаковой мощности передатчиков будет наибольшей для S -радара. Для S -радаров при выходной мощности 30 кВт максимальная шкала дальности равна 96 или 120 морских миль (соответственно 177 или 221 км). Для X -радаров выходная мощность передатчиков для различных типов РЛС равна 2, 4, 6, 10, 25, 30 кВт. При этом максимальная шкала дальности 48, 72, 96, 120 морских миль (соответственно 88, 132, 177, 221 км).

Заключение (Conclusion)

Сопоставление S -, X - и K_a -радаров возможно по результатам сравнения характеристик судовых РЛС. Сравнение следует проводить с учетом работы РЛС в различных погодных условиях и при различной рефракции атмосферы Земли. До принятия решения о размещении на судах K_a -радаров целесообразно выполнить оценку эффективности их работы при меньшей длительности зондирующих импульсов после повышения надежности электронных устройств.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Маринич А. Н.* Современные судовые и береговые радиолокационные станции (радары) отечественных и зарубежных фирм: монография / А. Н. Маринич [и др.]. — Петропавловск-Камчатский: Изд-во КамчатГТУ, 2012. — 166 с.
2. *Афанасьев В. В.* Судовые радиолокационные системы: учеб. / В. В. Афанасьев [и др.]; под ред. Ю. М. Устинова. — СПб.: Веленара, 2009. — 365 с.
3. *Дуров А. А.* Судовые радионавигационные приборы: учеб. / А. А. Дуров [и др.]. — Петропавловск-Камчатский: КамчатГТУ, 2010. — Ч. 1: Радиолокационные станции. — 264 с.
4. *Горобцов А. П.* Технические средства судовождения: учебник / А. П. Горобцов [и др.]; под ред. Ю. М. Устинова. — СПб.: Морстар, 2016. — Т. 3: Судовые приборы электронной навигации. — 472 с.
5. *Маринич А. Н.* Радиолокационное обнаружение нефтяных пятен на взволнованной морской поверхности / А. Н. Маринич, А. В. Припотнюк, Ю. М. Устинов // Научно-технический сборник Российского морского регистра судоходства. — 2014. — № 37. — С. 64–69.
6. *Pasya I.* Joint direction-of-departure and direction-of-arrival estimation in an ultra-wideband MIMO radar system / I. Pasya, N. Iwakiri, T. Kobayashi // Radio and Wireless Symposium (RWS), 2014 IEEE. — IEEE, 2014. — Рр. 52–54. DOI: 10.1109/RWS.2014.6830115.
7. *Маринич А. Н.* Сравнительная оценка информативности судовой РЛС/САПП в режимах радиолокационного измерения и OVERLAY с использованием данных АИС-целей / А. Н. Маринич [и др.] // Эксплуатация морского транспорта. — 2012. — № 4 (70). — С. 21–23.
8. *Маринич А. Н.* Мешающее действие туманов и снежных метелей на работу РЛС на трассе Северного морского пути / А. Н. Маринич, Ю. М. Устинов // Эксплуатация морского транспорта. — 2010. — № 4 (62). — С. 46–47.

9. Афанасьев В. В. Негативное влияние сложных погодных условий на работу радиолокационной станции на трассе Северного морского пути / В. В. Афанасьев, А. Н. Маринич, Ю. М. Устинов // Научно-технический сборник Российского морского регистра судоходства. — 2011. — № 31. — С. 296.
10. Афанасьев В. В. Оценка мешающего действия дождя на работу 10, 3 и 0,9-см радиолокационных станций / В. В. Афанасьев, А. Н. Маринич, Ю. М. Устинов // Эксплуатация морского транспорта. — 2009. — № 1 (55). — С. 21–24.
11. Lothes R. Radar Vulnerability to Jamming / R. N. Lothes, M. B. Szymansky, R. G. Wiley. — Norwood, MA, Artech House, 1990. — 258 p.
12. Шахнов С. Ф. Расчет функции ослабления поля контрольно-корректирующих станций с учетом влияния подстилающей поверхности / С. Ф. Шахнов // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2015. — № 1 (29). — С. 116–123. DOI: 10.21821/2309-5180-2015-7-1-116-123.
13. Matrosov S. Y. Prospects for Measuring Rainfall Using Propagation Differential Phase in X- and Ka-Radar Bands / S. Y. Matrosov, R. A. Kropfli, R. F. Reinking, B. E. Martner // Journal of Applied Meteorology. — 1999. — Vol. 38. — Is. 6. — Pp. 766–776. DOI: 10.1175/1520-0450(1999)038<0766:PFMRUP>2.0.CO;2.
14. Красюк В. Н. Особенности распространения радиоволн миллиметрового диапазона, перспективы их использования в современных радиотехнических системах / В. Н. Красюк, О. Ю. Платонов, А. Ю. Мельникова // Информационно-управляющие системы. — 2003. — № 4(5). — С. 33–38.

REFERENCES

1. Marinich, A. N., A. V. Pripotnyuk, Yu. M. Ustinov, V. S. Kan, and A. V. Bezumov. *Sovremennyye sudovyye i beregovyye radiolokatsionnyye stantsii (radary) otechestvennykh i zarubezhnykh firm: monografiya*. Petropavlovsk-Kamchatskii: Izd-vo KamchatGTU, 2012.
2. Afanas'ev, V. V., A. N. Marinich, A. V. Pripotnyuk, and Yu. M. Ustinov. *Sudovyye radiolokatsionnyye sistemy: uchebnik*. Edited by Yu. M. Ustinova. SPb.: Velenara, 2009.
3. Durov, A. A., V. S. Kan, A. N. Marinich, A. V. Pripotnyuk, and Yu. M. Ustinov. *Sudovyye radionavigatsionnyye pribory. Uchebnik dlya vuzov*. Chast' 1. Radiolokatsionnyye stantsii. Petropavlovsk-Kamchatskii: KamchatGTU, 2010.
4. Gorobtsov, A. P., A. N. Marinich, A. V. Pripotnyuk, and Yu. M. Ustinov. *Tekhnicheskyye sredstva sudovozhdeniya: uchebnik*. Tom 3. Sudovyye pribory elektronnoy navigatsii. Edited by Yu. M. Ustinova. SPb.: Morstar, 2016.
5. Marinich, A. N., A. V. Pripotnyuk, and Yu. M. Ustinov. "Radiolokatsionnoye obnaruzheniye neftyanykh pyaten na vzvolnovannoy morskoj poverkhnosti." *Nauchno-tekhnicheskii sbornik Rossiiskogo morskogo registra sudokhodstva* 37 (2014): 64–69.
6. Pasya, Idnin, Naohiko Iwakiri, and Takehiko Kobayashi. "Joint direction-of-departure and direction-of-arrival estimation in an ultra-wideband MIMO radar system." *Radio and Wireless Symposium (RWS), 2014 IEEE*. IEEE, 2014. 52–54. DOI: 10.1109/RWS.2014.6830115.
7. Marinich, A. N., A. V. Pripotnyuk, Y. M. Ustinov, and A. R. Shigabutdinov. "Comparative estimation of information provided by RADAR/ARPA in the modes of the radio-location measuring and OVERLAY with the use of these AIS-targets." *Ekspluatatsiya morskogo transporta* 4(70) (2012): 21–23.
8. Marinich, A. N., and Y. M. Ustinov. "Interference of fogs and snow blizzards on RADAR operation along Northern Sea Route." *Ekspluatatsiya morskogo transporta* 4(62) (2010): 46–47.
9. Afanas'ev, V. V., A. N. Marinich, and Yu. M. Ustinov. "Negativnoye vliyanie slozhnykh pogodnykh uslovii na rabotu radiolokatsionnoy stantsii na trasse Severnogo morskogo puti." *Nauchno-tekhnicheskii sbornik Rossiiskogo morskogo registra sudokhodstva* 31 (2011): 296.
10. Afanasiev, V. V., A. N. Marinich, and Y. M. Ustinov. "Rain interference on the 10.3 and 0.9 radars performance." *Ekspluatatsiya morskogo transporta* 1(55) (2009): 21–24.
11. Lothes, Robert N., Michael B. Szymansky, and Richard G. Wiley. *Radar Vulnerability to Jamming*. Norwood, MA, Artech House, 1990.
12. Shakhnov, S. F. "Calculation of function field weakening of the control and correction stations taking into account the influence of the underlying surface." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova* 1(29) (2015): 116–123. DOI: 10.21821/2309-5180-2015-7-1-116-123.

13. Matrosov, Sergey Y., Robert A. Kropfli, Roger F. Reinking, and Brooks E. Martner. "Prospects for measuring rainfall using propagation differential phase in X-and Ka-radar bands." *Journal of Applied Meteorology* 38.6 (1999): 766–776. DOI: 10.1175/1520-0450(1999)038<0766:PFMRUP>2.0.CO;2

14. Krasnyuk, V. N., O. Yu. Platonov, and A. Yu. Mel'nikova. "Osobennosti rasprostraneniya radiovoln milimetrovogo diapazona, perspektivy ikh ispol'zovaniya v sovremennykh radiotekhnicheskikh sistemakh." *Informatcionno-upravlyayushchie sistemy* 4(5) (2003): 33–38.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Горобцов Александр Петрович —
кандидат технических наук, доцент
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала
С.О. Макарова»
198035, Российская Федерация, Санкт-Петербург,
ул. Двинская, 5/7
e-mail: gorobtsovap@gumrf.ru
Маринич Александр Николаевич —
кандидат технических наук, доцент
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала
С.О. Макарова»
198035, Российская Федерация, Санкт-Петербург,
ул. Двинская, 5/7
e-mail: marinichan@gumrf.ru
Устинов Юрий Матвеевич —
доктор технических наук, профессор
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала
С.О. Макарова»
198035, Российская Федерация, Санкт-Петербург,
ул. Двинская, 5/7
e-mail: kaf_tsn@gumrf.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Gorobtsov, Alexander P. —
PhD, associate professor
Admiral Makarov State University of Maritime
and Inland Shipping
5/7 Dvinskaya Str, St.-Petersburg, 198035,
Russian Federation
e-mail: gorobtsovap@gumrf.ru
Marinich, Alexander N. —
PhD, associate professor
Admiral Makarov State University of Maritime
and Inland Shipping
5/7 Dvinskaya Str, St.-Petersburg, 198035,
Russian Federation
e-mail: marinichan@gumrf.ru
Ustinov, Yury M. —
Dr. of Technical Sciences, professor
Admiral Makarov State University of Maritime
and Inland Shipping
5/7 Dvinskaya Str, St.-Petersburg, 198035,
Russian Federation
e-mail: kaf_tsn@gumrf.ru

*Статья поступила в редакцию 13 сентября 2018 г.
Received: September 13, 2018.*

ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И АВТОМАТИЗАЦИЯ НА ТРАНСПОРТЕ

DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-5-1094-1103

SET THEORY MODEL FOR THE ASSESSMENT OF THE CONTAINER TERMINAL'S OPERATIONAL RESOURCES

A. L. Kuznetsov, A. D. Semenov, V. N. Shcherbakova-Slyusarenko

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

The paper describes a set-theoretical model of a universal container terminal functional structure handling a complex structured cargo flow. It is represented that the chosen form of model's and its activity description allows to reveal the complex mechanism of terminal's functional elements cooperation and consider the specification of different cargo flow handling process. The suggested model is not just a good description of the container terminal structure and its elements cooperation, but it is also a tool for the research of the specification of its characteristics' dynamic changes. And, therefore, build theories on the system's action. It is represented that get all these features of the model it is not necessary to apply a computer modelling. All the results are calculated from the suggested matrix forms. As a consequence, a set-theoretical model of such a type can be used as standard in the process of creation of hierarchical consequence of the models with more precise characteristics which helps in the objective proof of a model's adequacy. The results of container terminal activity modelling based on the suggested set-theoretical model is also represented in the paper. The utilization of the model allows to calculate the probability distribution of the necessary equipment number. And this distribution can be computed without considering of stochastic features of the parameters that were used in the calculations. It can be achieved because the model considers dynamical characteristic of a system, i. e. the change of its parameters through time.

Keywords: port model, set-theoretical model, cargo flow irregularity, handling equipment

For citation:

Kuznetsov, Aleksandr L., Anton D. Semenov, and Victoria N. Shcherbakova-Slyusarenko. "Set theory model for the assessment of the container terminal's operational resources." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova* 10.5 (2018): 1094–1103. DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-5-1094-1103.

УДК 656.615

ТЕОРЕТИКО-МНОЖЕСТВЕННАЯ МОДЕЛЬ ДЛЯ РАСЧЕТА ОПЕРАЦИОННЫХ РЕСУРСОВ КОНТЕЙНЕРНОГО ТЕРМИНАЛА

А. Л. Кузнецов, А. Д. Семенов, В. Н. Щербакова-Слюсаренко

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

В статье описывается теоретико-множественная модель функциональной структуры контейнерного терминала общего вида и структуры сложного грузопотока, обрабатываемого этим контейнерным терминалом. Показано, что выбранная форма описания модели и ее функционирования, несмотря на самый общий характер дескриптивных свойств, позволяет отразить скрытые механизмы взаимодействия отдельных функциональных элементов и учесть специфику обработки грузопотоков различной природы. Предложенная модель не только исчерпывающе описывает содержательно структуру и отношения всех операционных компонент контейнерного терминала, но и позволяет исследовать особенности динамического изменения характеристик во времени, т. е. выносить суждения о характере поведения моделируемого объекта. Показано, что для получения всех этих возможностей не требуется

какая-либо трансляция теоретико-множественного описания в исполнительную компьютерную модель, т. е. отсутствует этап программирования как таковой, и все результаты выводятся непосредственно из матричных представлений. Как следствие, теоретико-множественные модели подобного рода могут служить в качестве эталонов в процедуре создания иерархической последовательности моделей со все более уточняющимися представлениями, с помощью которых обеспечивается объективное доказательство их адекватности. В работе также представлены результаты моделирования деятельности контейнерного терминала с помощью предложенного метода. Использование теоретико-множественной модели для анализа необходимого количества оборудования позволяет получить вероятностное распределение потребности в этом оборудовании. При этом распределение может быть получено без учета случайного характера используемых при расчетах параметров. Это объясняется тем, что модель позволяет учесть динамический характер работы изучаемой системы, т. е. изменение входных параметров во времени.

Ключевые слова: модель порта, теоретико-множественная модель, неравномерность грузопотока, перегрузочное оборудование.

Для цитирования:

Кузнецов А. Л. Теоретико-множественная модель для расчета операционных ресурсов контейнерного терминала / А. Л. Кузнецов, А. Д. Семенов, В. Н. Щербакова-Слюсаренко // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2018. — Т. 10. — № 5. — С. 1094–1103. DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-5-1094-1103.

Введение (Introduction)

Теоретико-множественные методы являются традиционным инструментом для описания фундаментальных свойств математических моделей различных объектов [1], [2]. Ведя свою историю от теории множеств, появившейся и плодотворно развивавшейся задолго до эры компьютеров [3], [4], эти методы успешно использовались для описания и представления фундаментальных свойств моделей самого общего вида [5]. Повсеместное использование теоретико-множественных моделей объясняется тем, что они обладают глубиной выразительных средств, компактностью и универсальностью, что, в первую очередь, и требуется для формализации интуитивных представлений.

Появление компьютера как технического средства и дискретной математики как теории его использования ознаменовало собой смену парадигмы в прикладных научных дисциплинах [6], [7]. Алгоритмические языки, созданные для управления техническими средствами вычислительной техники при решении с помощью последних научных и прикладных задач, постепенно сместили теоретико-множественные методы с ведущих позиций в задачах описания и представления свойств моделей. Теоретико-множественные нотации в большей мере начали использоваться там, где алгоритмическое решение оказывалось невозможным, а модели носили формальный умозрительный характер, чаще всего не допускающий их вычислительной реализации. Это положение коренным образом изменилось с развитием технологии создания программного продукта [8], [9]. Алгоритмическое (или «императивное») программирование постепенно стало одним из равных среди средств вычислительной техники наряду с программированием логическим, функциональным, объектно-ориентированным и др. [10], [11]. Выяснилось, что теоретико-множественные методы намного больше соответствуют новым информационным технологиям, и теперь уже классическое императивное программирование стало вытесняться в «интернет вещей», придавая им более «интеллектуальный» характер за счет встроенных микропроцессоров, отвечающих за алгоритмическое поведение. В то же время накопленный опыт реализации программных проектов позволил установить, что теоретико-множественные модели обладают способностью не только отражать основные структурные особенности, взаимосвязи и отношения отдельных компонент сложных объектов, но и моделировать их поведение.

Настоящая статья описывает именно такой пример использования формального теоретического описания объекта — контейнерного терминала — методами теории множеств, которое позволяет выносить суждения о динамических потребностях в технологических ресурсах.

Методы и материалы (Methods and Materials)

В описываемом исследовании используются методы теории множеств, аппарат теории матриц и реляционные базы данных. Базовые элементы обобщенного грузопотока и предлагаемой теоретико-множественной модели контейнерного терминала описываются векторными структурами, точнее, вектор-строками и вектор-столбцами. Взаимодействия между операционными элементами модели при обработке грузопотока задаются матрицами, которые определяют отношения между компонентами грузопотока и элементами модели, а также задают временные характеристики частных грузопотоков, из которых складывается обобщенный грузопоток терминала. Для получения валидных и практически значимых моделей, позволяющих изучать динамику спроса на операционные ресурсы для реальных объектов, вполне адекватными оказываются средства MS Excel.

Результаты (Results)

Моделирование такого сложного объекта, как контейнерный терминал требует создания двух систем: статической и динамической. Первая предполагает, что все переменные не изменяют своего значения во времени. Разработка этой модели необходима как база для создания более близкой реальности динамической модели, учитывающей данный фактор.

Статический расчет требований к ресурсам. Грузопоток Q , протекающий через терминал за произвольный период T , будем понимать как совокупность частных грузопотоков, входящих на терминал через его периметр и покидающих терминал через него, или как вектор-столбец $Q = \|q_k\|_{k \times 1}$.

Каждый частный грузопоток проходит через свою последовательность элементов терминала, перемещение между которыми называется *транспортной операцией*, или просто *операцией*. Операции представляют собой ребра графа функциональной структуры терминала, вершинами которого являются грузовые фронты, склады и другие базовые элементы (рис. 1).

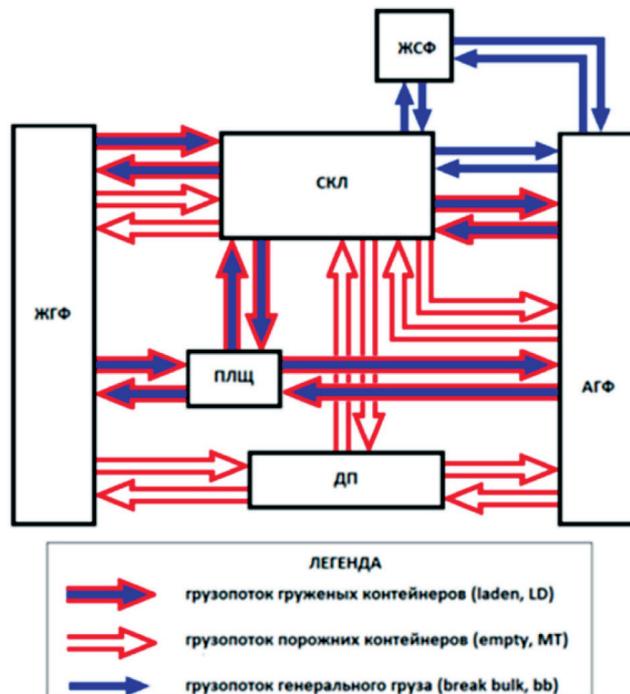


Рис. 1. Функциональная структура терминала

Операции представлены вектором-строкой $W = \|w_i\|_{1 \times J}$. Последовательность операций, которая характеризует прохождение через терминал каждого частного грузопотока q_k , называется *технологическим маршрутом*. Состав операций технологических маршрутов, необходимых

для обработки частных грузопотоков, задается бинарной матрицей технологических маршрутов $A = \|\alpha_{k,i}\|_{K \times I}$, где $\alpha_{ki} = 1$, если операция i входит в технологический маршрут грузопотока q_k , и $\alpha_{ki} = 0$ в противоположном случае. Объем грузопотока q_k , умноженный на α_{ki} , образует элемент матрицы операционных заданий, определяющей нагрузку на каждую операцию от частных грузопотоков, или $R = \|r_{k,i}\|_{K \times I}$, где $r_{ki} = q_k \alpha_{ki}$.

Для выполнения операций используется то или иное оборудование из множества $E = \|e_j\|_{1 \times J}$, участие которого в конкретной операции задается бинарной матрицей технологии $B = \|\beta_{i,j}\|_{I \times J}$, где $\beta_{ij} = 1$, если в операции i задействовано оборудование типа e_j , и $\beta_{ij} = 0$ в противоположном случае.

В каждой операции могут быть задействованы несколько видов оборудования, составляющих некоторое технологическое звено. По этой причине матрица технологического оборудования задается для каждого звена l отдельно, т. е. каждой операции соответствует несколько матриц технологии операций B^l , сопоставимых с каждым операционным звеном.

Каждый тип оборудования в отдельных звеньях различных технологических операций характеризуется своей производительностью, задаваемой аналогичной по структуре матрицей производительности $P = \|p_{i,j}\|_{I \times J}$, где $p_{i,j}$ — производительность оборудования e_j при его использовании в операции i .

Если оборудование e_j в течение всего периода T используется непрерывно, то его выработка за весь этот период, при участии в звене l технологической операции i , составит величину $p_{ij}T$. Поскольку задание на выполнение операции i конкретным грузопотоком k известно и составляет R_{ki} , число требуемых машин типа e_j в составе звена l технологической операции i составит

$$n_j = \frac{R_{ki}}{p_{ij}T}.$$

Суммирование потребности оборудования типа e_j по всем операциям i и всем грузопотокам k позволяет оценить среднюю совокупную потребность в нем на интервале T , т. е.

$$N_j = \sum_i \sum_k \frac{A_{ki}}{p_{ij}T}.$$

Если оборудование e_j в течение периода T в звене l технологической операции i используется с коэффициентом k_{ij} , то его выработка в течение всего этого периода составит величину $p_{ij}k_{ij}T$, что приведет к росту потребности в нем. Коэффициенты использования оборудования в различных звеньях технологических операций задаются матрицей коэффициентов использования $K = \|k_{i,j}\|_{I \times J}$. Используя эти значения, можно получить оценку средней потребности в оборудовании каждого вида типа вектора-столбца: $n = \|n_j\|_{J \times 1}$.

Динамический расчет требований к ресурсам. Рассмотрим годовой грузооборот контейнерного терминала Q , который является суммой частных грузопотоков $Q = \sum_{k=1}^K q_k$. Среднее значение

грузооборота за месяц составляет величину $\overline{q_{\text{мес}}} = \frac{Q}{12}$, среднее значение суточного грузопотока — величину $\overline{q_{\text{сут}}} = \frac{Q}{365}$. Так же могут определяться любые иные грузопотоки — кварталный, сменный, декадный. В то же время каждый грузопоток может характеризоваться своим расписанием прохождения в рассматриваемый промежуток времени: годовой грузопоток может быть равномерным или концентрироваться в более коротком периоде, недельный грузопоток может предполагать различное распределение по дням недели, в течение суток может наблюдаться разная активность в дневные и ночные часы и др. Иными словами, если любой рассматриваемый интервал времени T разбивается на N интервалов $\Delta T = \frac{T}{N}$, то интенсивность частного (и, соответственно, суммарного) грузопотока, понимаемая как количество груза, требующего обработки

за период времени ΔT , или $q_{\Delta T} = \frac{\Delta Q}{\Delta T}$, является переменной (случайной) величиной, колеблющейся вокруг среднего значения за весь период $\bar{q}_T = \frac{Q}{T}$. Как следствие, требования к ресурсам для выполнения операций с разной интенсивностью также будут являться переменными, колеблющимися вокруг некоторых средних значений.

Каждый интервал времени для тех или иных целей анализа разбивается на меньшие интервалы: год — на полугодия, кварталы, месяцы; месяц — на декады или недели; недели — на сутки; сутки — на смены или часы; смены — на часы. Объем грузопотока для каждого из разбиваемых на части первичных интервалов является квазидетерминированной величиной: каждый частный (проектный) годовой грузопоток является «точечным» значением, которое разбивается на различные (вариативные) месячные грузопотоки; каждый отдельный частный вариативный месячный грузопоток, в свою очередь, является «точечным» значением для разбиения на различные суточные грузопотоки; каждый отдельный суточный грузопоток опять становится «точечным» значением для разбиения на различные часовые грузопотоки (рис. 2).

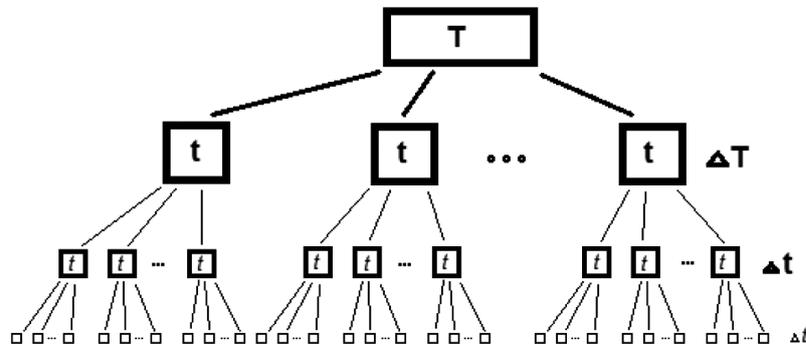


Рис. 2. Иерархия интервалов моделирования

Пусть интервал T разбивается на N интервалов $\Delta T = t = \frac{T}{N}$, т. е. $T = \|u_i\|_{1 \times N}$. Предположим, что известно задание на обработку в пределах интервала T , т. е. какой объем грузопотока обрабатывается в каждом дискрете ΔT . Способ, с помощью которого это осуществляется, т. е. каким образом объем грузопотока Q^k разбивается на значения q_n^k , $n = \overline{1, N}$, может быть различным, и здесь это распределение считается заданным, т. е. известны значения матрицы $Q^k = \|q_k[t]\|_{K \times N} = \|q_{k,t}\|_{K \times N}$.

В этом случае оценку потребности в оборудовании e_j в составе звена l технологической операции i от грузопотока k задает выражение $n_j = \frac{q_n^k}{p_{ij} \Delta T}$. Суммирование требований к оборудованию по всем операциям дает возможность получить оценки потребности в различном оборудовании в каждый момент времени ΔT анализируемого интервала T , или матрицу $N = \|n_{i,t}\|_{J \times T}$.

Обсуждение (Discussion)

Предложенная модель позволяет выполнить расчет необходимого количества оборудования на контейнерном терминале с учетом неравномерностей частных грузопотоков. Годовой грузопоток терминала, состоящий из множества частных грузопотоков, задается матрицей, представленной в табл. 1.

Таблица 1

Матрица частных грузопотоков

Грузопотоки					
q_1	q_2	...	q_k	...	q_k

Прохождение грузопотока через структурные элементы грузового терминала описывается множеством операций, необходимых для обработки данного грузопотока, и представляется в виде матрицы технологического маршрута (табл. 2).

Таблица 2

Матрица технологического маршрута

Грузопотоки	Операции					
	w_1	w_2	...	w_i	...	w_j
q_1	$\alpha_{1,1}$	$\alpha_{1,2}$	...	$\alpha_{1,i}$	...	$\alpha_{1,j}$
q_2	$\alpha_{2,1}$	$\alpha_{2,2}$	...	$\alpha_{2,i}$	...	$\alpha_{2,j}$
...
q_k	$\alpha_{k,1}$	$\alpha_{k,2}$	...	$\alpha_{k,i}$	...	$\alpha_{k,j}$
...
q_K	$\alpha_{K,1}$	$\alpha_{K,2}$	...	$\alpha_{K,i}$	...	$\alpha_{K,j}$

Произведение матрицы частных грузопотоков на матрицу технологических маршрутов дает нагрузку на операцию. Каждая операция при этом требует определенного перегрузочного оборудования для ее выполнения. Матрица, с помощью которой задается используемое в операции технологическое оборудование, называется *матрицей технологии операции* (табл. 3). При этом, поскольку для выполнения операции может потребоваться перегрузочная линия, в состав которой входит несколько различных единиц оборудования, при расчетах может использоваться ряд матриц технологии операции.

Таблица 3

Матрица технологии операции

Операции	Оборудование звена 1					
	e_1	e_2	...	e_j	...	e_j
w_1	$\beta_{1,1}$	$\beta_{1,2}$	...	$\beta_{1,j}$	...	$\beta_{1,j}$
w_2	$\beta_{2,1}$	$\beta_{2,2}$	...	$\beta_{2,j}$	...	$\beta_{2,j}$
...
w_i	$\beta_{i,1}$	$\beta_{i,2}$	...	$\beta_{i,j}$	...	$\beta_{i,j}$
...
w_j	$\beta_{j,1}$	$\beta_{j,2}$	...	$\beta_{j,j}$	...	$\beta_{j,j}$

Каждая единица перегрузочного оборудования описывается матрицей производительности этого оборудования на каждой операции (табл. 4).

Таблица 4

Матрица производительности оборудования

Операции	Производительность звена 1					
	e_1	e_2	...	e_j	...	e_j
w_1	$p_{1,1}$	$p_{1,2}$	...	$p_{1,j}$	...	$p_{1,j}$
w_2	$p_{2,1}$	$p_{2,2}$	...	$p_{2,j}$	...	$p_{2,j}$
...
w_i	$p_{i,1}$	$p_{i,2}$	...	$p_{i,j}$	...	$p_{i,j}$
...
w_j	$p_{j,1}$	$p_{j,2}$	...	$p_{j,j}$	...	$p_{j,j}$

Прохождение грузопотока через терминал во времени характеризуется неравномерностью, задаваемой периодом обработки каждого частного грузопотока. Неравномерность частного грузопотока описывается матрицей его значений на каждый малый период ΔT (табл. 5).

Таблица 5

Распределение частных грузопотоков во времени

ΔT	ΔT	ΔT	ΔT	...	ΔT
q_1^1	q_2^1	q_3^1	q_4^1	...	q_N^1
q_1^2	q_2^2	q_3^2	q_4^2	...	q_N^2
...
q_1^K	q_2^K	q_3^K	q_4^K	...	q_N^K

Каждый частный грузопоток может быть распределен на разные частичные промежутки времени, что оказывает влияние на объем и интенсивность поступления суммарного грузопотока на терминал (рис. 3).

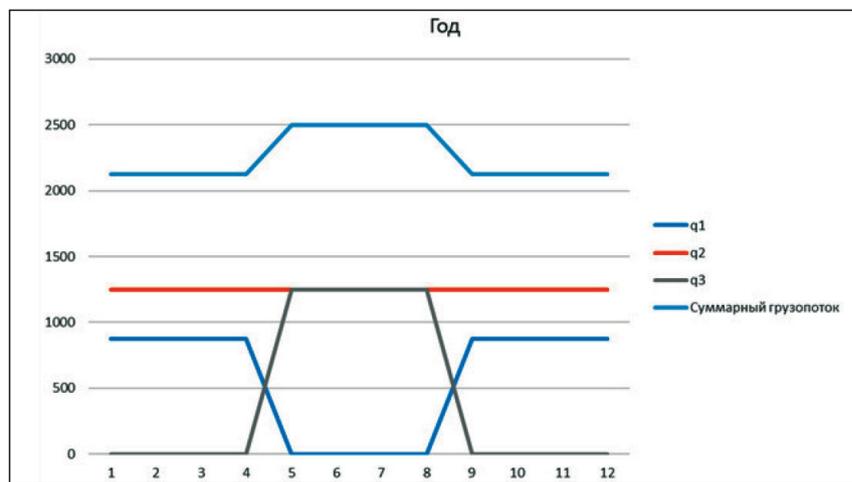


Рис. 3. Распределение частных и суммарного грузопотоков во времени

Неравномерное распределение грузопотока в течение года и наложение частных грузопотоков друг на друга дает более высокую суточную нагрузку на операции, в связи с чем повышается потребность в количестве перегрузочного оборудования. На рис. 4 представлен график изменения суточной потребности в оборудовании в разные периоды года, из которого можно определить вклад каждого частного грузопотока в общую потребность в перегрузочном оборудовании (рис. 5).

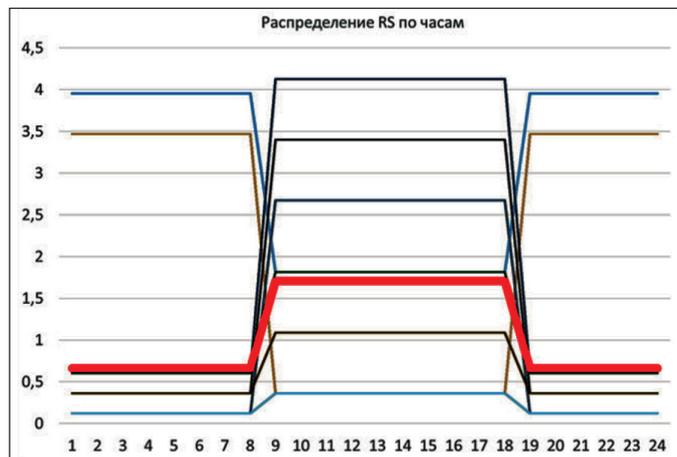


Рис. 4. Распределение потребности в перегрузочном оборудовании в разные периоды года

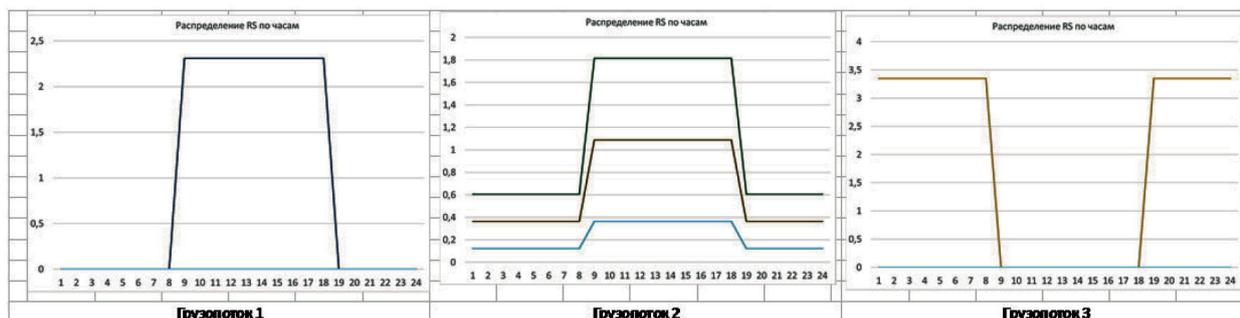


Рис. 5. Распределение потребности в оборудовании для частных грузопотоков

На рис. 6 представлена гистограмма распределения вероятностей в потребности необходимого оборудования. Как видно из представленных графиков, неравномерное распределение частных грузопотоков приводит к существенным всплескам в потребности в оборудовании. При этом следует учитывать, что при расчете необходимого количества оборудования все переменные считались детерминированными. Распределение в потребности оборудования было получено без применения методов имитационного моделирования, т. е. без учета случайного характера параметров модели, а только путем использования предложенной динамической теоретико-множественной модели, позволяющей учесть неравномерность поступающего грузопотока. Таким образом, предложенная модель может быть использована как основа для создания имитационных моделей грузовых терминалов.

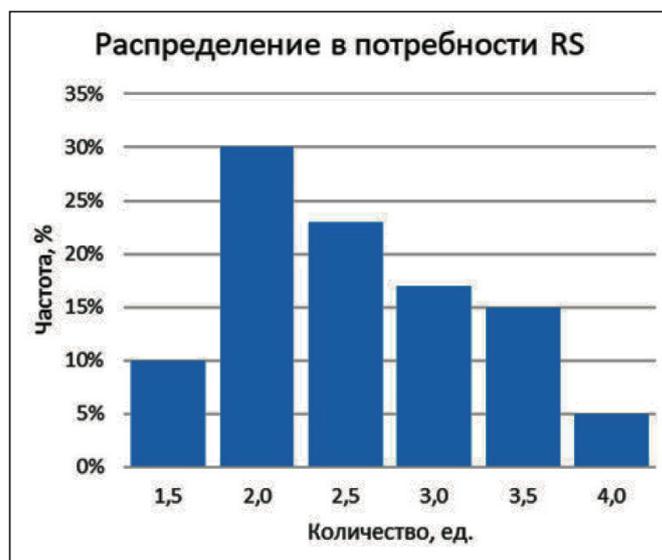


Рис. 6. Гистограмма распределения потребности в оборудовании

Выводы (Summary)

На основе выполненного исследования можно сделать следующие выводы:

1. В работе была предложена теоретико-множественная модель, описывающая деятельность контейнерного терминала, обрабатывающего сложный структурированный грузопоток.
2. Применение модели к расчету необходимого количества перегрузочного оборудования позволяет получить распределение вероятностей в его потребности с учетом неравномерных грузопотоков.
3. Предложенная модель может быть использована как основа для создания более сложных имитационных моделей.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ершов Ю. Л. Математическая логика / Ю. Л. Ершов, Е. А. Палютин. — М.: Наука, 1987. — 336 с.
2. Проталинский О. М. Теоретико-множественная модель процессов грузового порта / О. М. Проталинский, А. А. Ханова, И. О. Григорьева // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Управление, вычислительная техника и информатика. — 2009. — № 2. — С. 83–89.
3. Von Herrn Cantor. Über eine Eigenschaft des Inbegriffes aller reellen algebraischen Zahlen / Von Herrn Cantor // Journal für die Reine und Angewandte Mathematik. — 1985. — Vol. 1874. — Is. 77. — Pp. 258–262. DOI: 10.1515/crll.1874.77.258.
4. Cantor G. Über unendliche, lineare Punktmannigfaltigkeiten / G. Cantor // Mathematische Annalen. — 1883. — Vol. 21. — Pp. 545–591. DOI: 10.1007/BF01446819.
5. Михеев М. Ю. Математические и информационно-структурные модели эргатических систем: монография / М. Ю. Михеев [и др.]. — Пенза: Изд-во ПензГТУ, 2015. — 160 с.
6. Elrad T. Aspect-oriented programming / T. Elrad, R.E. Filman, A. Bader // Communications of the ACM. — 2001. — Vol. 44. — No. 10. — Pp. 29–32. DOI:10.1145/383845.383853.
7. Simmonds D. M. The Programming Paradigm Evolution / D. M. Simmonds // Computer. — 2012. — Vol. 45. — No. 06. — Pp. 93–95. DOI: 10.1109/MC.2012.219.
8. Völter M. Model-driven software development: technology, engineering, management / M. Völter, T. Stahl, J. Bettin, A. Haase, S. Helsen. — John Wiley & Sons, 2006. — 446 p.
9. Mens T. Challenges in software evolution / T. Mens, M. Wermelinger, S. Ducasse, S. Demeyer, R. Hirschfeld, M. Jazayeri // Eighth International Workshop on Principles of Software Evolution (IWPSE'05). — IEEE, 2005. — Pp. 13–22. DOI: 10.1109/IWPSE.2005.7.
10. Шилов Н. В. Заметки о трёх парадигмах программирования / Н. В. Шилов // Компьютерные инструменты в образовании. — 2010. — № 2. — С. 24–37.
11. Frame S. A Comparison of Functional and Imperative Programming Techniques for Mathematical Software Development / S. Frame, J. W. Coffey // Journal of Systemics, Cybernetics and Informatics. — 2014. — Vol. 12. — Num. 2. — Pp. 49–53.

REFERENCES

1. Ershov, Yu. L., and E. A. Palyutin. *Matematicheskaya logika*. M.: Nauka, 1987.
2. Protalinskiy, Oleg Miroslavovich, Anna Alexeevna Khanova, and Irina Olegovna Grigorieva. “Set-theoretical model of cargo port activity.” *Vestnik of Astrakhan State Technical University. Series: Management, Computer Science and Informatics* 2 (2009): 83–89.
3. Von Herrn Cantor. “Über eine Eigenschaft des Inbegriffes aller reellen algebraischen Zahlen.” *Journal für die Reine und Angewandte Mathematik* 1874.77 (1985): 258–262. DOI: 10.1515/crll.1874.77.258.
4. Cantor, G. “Über unendliche, lineare Punktmannigfaltigkeiten.” *Mathematische Annalen* 21(1883): 545–591. DOI: 10.1007/BF01446819.
5. Mikheev, M. Yu., T.V. Zhashkova, I.Yu. Semochkina, et al. *Matematicheskie i informatsionno-strukturnye modeli ergaticheskikh sistem: Monografiya*. Penza: PenzGTU, 2015.
6. Elrad, Tzilla, Robert E. Filman, and Atef Bader. “Aspect-Oriented Programming.” *Communications of the ACM* 44.10 (2001): 29–32.
7. Simmonds, Devon M. “The Programming Paradigm Evolution.” *Computer* 45.06 (2012): 93–95. DOI: 10.1109/MC.2012.219.
8. Völter, M., T. Stahl, J. Bettin, A. Haase, and S. Helsen. *Model-driven software development: technology, engineering, management*. John Wiley & Sons, 2006.
9. Mens, Tom, Michel Wermelinger, Stane Ducasse, Serge Demeyer, Robert Hirschfeld, and Mehdi Jazayeri. “Challenges in Software Evolution.” *Eighth International Workshop on Principles of Software Evolution (IWPSE'05)*. IEEE, 2005. 13–22. DOI: 10.1109/IWPSE.2005.7.
10. Shilov, N. V. “Zametki o trekh paradigmakh programmirovaniya.” *Komp'yuternye instrumenty v obrazovanii* 2 (2010): 24–37.
11. Frame, Scott, and John W. Coffey. “A Comparison of Functional and Imperative Programming Techniques for Mathematical Software Development.” *Journal of Systemics, Cybernetics and Informatics* 12.2 (2014): 49–53.

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

Семенов Антон Денисович —

диспетчер
ООО «Логистический парк «Янино»
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала
С. О. Макарова»
198035, Российская Федерация, Санкт-Петербург,
ул. Двинская, 5/7

Научный руководитель:

Кузнецов Александр Львович,
доктор технических наук, профессор
e-mail: asemyonov054@gmail.com

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

Semenov, Anton D. —

dispatcher
LLC "Logistics Park "Yanino"
Admiral Makarov State University of Maritime
and Inland Shipping
5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg 198035,
Russian Federation

Scientific adviser:

Kuznetsov, Aleksandr L.
Dr. of Technical Sciences, professor
e-mail: asemyonov054@gmail.com

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

Научное периодическое издание

**Вестник Государственного университета морского
и речного флота имени адмирала С. О. Макарова**

Том 10. № 5

2018 год

Выпускающий редактор *Н. А. Карамзина*
Редактор *Т. В. Середова*
Дизайн и верстка *М. Н. Евсюткина*

Подписано в печать с оригинал-макета 22.10.18. Формат 60×90/8
Гарнитура Times New Roman. Усл. печ. л. 27. Тираж 500 экз. Заказ № 601/18

Государственный университет морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова
198035, Санкт-Петербург, ул. Двинская, 5/7