

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 11. № 6

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

**САНКТ-ПЕТЕРБУРГ
2019**

Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — СПб. : ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова, 2019. — Т. 11. — № 6. — 196 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».

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

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

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



ISSN 2309-5180



© Государственный университет морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова, 2019



20.01.1941 – 20.09.2019

КУЗЬМИЦКИЙ МИХАИЛ ЛЕОНИДОВИЧ

**доктор технических наук, главный научный сотрудник,
заведующий лабораторией Технологии ремонта машин и механизмов**

С глубоким прискорбием сообщаем, что 20 сентября 2019 года ушел из жизни прекрасный человек, замечательный ученый, ветеран отрасли Михаил Леонидович Кузьмицкий.

Михаил Леонидович начал свою трудовую деятельность в 1957 году учеником слесаря монтажника. В 1959 году поступил на Судомеханический факультет Ленинградского института водного транспорта (ЛИВТ), по окончании получил квалификацию инженера-механика, в 1965 году по распределению был принят на Ленинградскую РЭБ флота. В период 1965–1966 г. прошел службу в рядах Советской Армии.

После службы в рядах Советской Армии вся трудовая деятельность М. Л. Кузьмицкого была неразрывно связана с Ленинградским институтом водного транспорта.

В 1967 году Михаил Леонидович поступил на должность инженера кафедры технологии судостроения и судоремонта ЛИВТ, с 1969 был ассистентом на кафедре, в 1971 году поступил в очную аспирантуру, а в 1975 успешно защитил кандидатскую диссертацию.

В период с 1972 по 1977 год Михаил Леонидович прошел путь от младшего научного сотрудника до заведующего лабораторией методов неразрушающего контроля при кафедре, которая в 1984 году была выделена как отдельная лаборатория технологии ремонта машин и механизмов (по н. в.). В 2000 году защитил докторскую диссертацию.

Более 52 лет он жил с институтом одной жизнью, его проблемами, его буднями, его достижениями и радостями.

Михаил Леонидович является автором более ста научных публикаций, восьми патентов на изобретение. Он был одним из ведущих специалистов в области обеспечения безопасности судоходных гидротехнических сооружений. При его участии была организована и продолжает действовать по настоящее время система наблюдений и исследований за изменением технического состояния механического оборудования судоходных шлюзов. До последних дней Михаил Леонидович вел активную научную работу, был членом диссертационного совета университета, являлся научным руководителем аспирантов, входил в состав редакционной коллегии научного журнала «Вестник государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова».

Михаил Леонидович принимал активное участие в выполнении научно-исследовательских работ отраслевого значения по проблемам повышения безопасности и надежности механического оборудования судоходных гидротехнических сооружений, в том числе по разработке нормативно-технической документации, по совершенствованию эксплуатации и ремонта механического оборудования гидротехнических сооружений, рецензированию проектной документации по реконструкции и ремонту сооружений, обследованию и определению технического состояния ворот и затворов судоходных шлюзов Беломорканала, Волго-Балта, Волго-Дона, Азово-Дона, Камводпути, Севводпути, Енисейречтранса.

Михаил Леонидович был скромным, высокообразованным, культурным, отзывчивым, но вместе с тем требовательным и принципиальным специалистом, пользовался заслуженным авторитетом среди работников университета и организаций водного транспорта России. Его отличали фундаментальные знания, высокий профессионализм, приобретенный с годами огромный опыт научной работы, авторитет в коллективе, незаурядные личные качества.

Память о Михаиле Леонидовиче — замечательном человеке и специалисте высочайшего класса, навсегда сохранится в наших сердцах.

СОДЕРЖАНИЕ

ЭКСПЛУАТАЦИЯ ВОДНОГО ТРАНСПОРТА, СУДОВОЖДЕНИЕ 977

Искандеров Ю. М., Рудых С. В., Пелевин А. Е. Подход к формированию интеллектуальной системы транспортно-логистической информации 977

Каретников В. В., Козик С. В., Буцанец А. А. К вопросу оценки рисков использования безэкипажных средств водного транспорта на участке акватории 987

Лысенко Ю. Н., Соколов А. И., Соколова И. А. Метод обеспечения безопасности плавания судов на основе оценки функционального состояния судоводителя 1003

Селезень Я. Ю. Анализ методик определения возможного местоположения объекта поиска и спасания на море с учетом дрейфа 1011

Ююкин И. В. Сплайн-интерполяция навигационных изолиний 1026

Изотов О. А. Преимущества внедрения новых средств укрупнения сборных грузов в контейнерные перевозки 1037

ВОДНЫЕ ПУТИ СООБЩЕНИЯ И ГИДРОГРАФИЯ 1044

Гладков Г. Л., Журавлев М. В. Гидравлическое сопротивление движению воды и транспорт наносов в реках 1044

Кожухов И. В., Спиридонов М. А. Проблемы формирования пляжей в условиях южного побережья восточной части Финского залива 1056

Фирсов Ю. Г. Специальное навигационное обеспечение и точность батиметрической съемки для решения задач глубоководных геологоразведочных работ 1070

СУДОСТРОЕНИЕ И СУДОРЕМОНТ 1088

Леонтьев Л. Б., Погодаев А. В., Болотова В. П. Особенности изнашивания втулок цилиндров судовых среднеоборотных дизелей 1088

Уколов А. И., Родионов В. П. Моделирование истечения кавитирующей струи на биообрастание поверхности судостроительной стали 1096

Кузнецов Р. В., Ольховик Е. О. Экспериментальное исследование теплофизических свойств материалов биметаллического подшипника для судового машиностроения 1107

СУДОВЫЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ УСТАНОВКИ, СИСТЕМЫ И УСТРОЙСТВА 1115

Герасимов Н. И., Грачев И. В., Жуков В. А. Влияние серийности постройки судов на трудоемкость монтажа энергетического оборудования 1115

Железняк А. А., Ениватов В. В., Доровской В. А. Проблема диагностики судового энергетического оборудования 1123

Том 11. № 6

2019

РЕДАКЦИОННЫЙ СОВЕТ

Гл. редактор

С. О. Барышников

д.т.н., проф.

rector@gumrf.ru

Зам. гл. редактора

А. П. Нырк

д.т.н., проф.

NyrkowAP@gumrf.ru

С. Гуцма

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

Г. В. Егоров

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

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

научный руководитель 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.
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.
М. А. Колосов, д.т.н.
Е. А. Королёва, д.э.н.
И. И. Костылев, д.т.н.
А. Л. Кузнецов, д.т.н.
С. Е. Кузнецов, д.т.н.
Е. А. Лаврентьева, д.э.н.
В. А. Логиновский, д.т.н.
В. Е. Марлей, д.т.н.
А. М. Никитин, д.т.н.
Т. А. Пантина, д.э.н.
Л. И. Погодаев, д.т.н.
В. И. Решняк, д.т.н.
В. В. Романовский, д.т.н.
А. В. Саушев, д.т.н.
С. В. Смоленцев, д.т.н.
А. Л. Степанов, д.т.н.
М. В. Сухотерин, д.т.н.
Е. Г. Трунин, к.э.н.
А. Л. Тезиков, д.т.н.
В. Б. Чистов, д.т.н.

Медведев Г. В., Горлова Н. Н. Состояние проблемы и варианты
снижения вредных выбросов дизельных судовых энергетических
установок 1133

ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ КОМПЛЕКСЫ И СИСТЕМЫ..... 1141

Ву В. М., Чернов Б. Б., Нугманов А. М. Оценка эффективности
установки катодной защиты морских сооружений с использованием
питания от солнечных панелей..... 1141

Махмууд С. Н., Абдалгбар О. Д., Соломин Е. В. Влияние природы региона
на производительность ветроэнергетики 1152

OPERATION OF WATER TRANSPORT, NAVIGATION 977

Iskanderov Yu. M., Rudykh S. V., Pelevin A. E. The approach to the formation of an intelligent system of transport and logistics information..... 977

Karetnikov V. V., Kozik S. V., Butsanets A. A. Risks assessment of applying unmanned means of water transport in the water area 987

Lisenko U. N., Sokolov A. I., Sokolova I. A. Assessment of the functional states of biological objects by the gas-discharge visualization method..... 1003

Selezen Y. Y. Review of search and rescue drifting object at sea possible location estimation techniques..... 1011

Yuyukin I. V. Spline interpolation of navigational isolines..... 1026

Izotov O. A. Advantages of introducing new means of consolidating groupage cargoes into container transportation 1037

WATERWAYS AND HYDROGRAPHY 1044

Gladkov G. L., Zhuravlev M. V. Hydraulic resistance to water flow and sediment transport in rivers..... 1044

Kozhuhov I. V., Spiridonov M. A. Problems of beaches formation in the south coast of the Gulf of Finland eastern part..... 1056

Firsov Yu. G. Special navigational support and accuracy of bathymetric surveys for deep-sea marine geological investigations..... 1070

SHIPBUILDING AND SHIP REPAIR 1088

Leont'ev L. B., Pogodaev A. V., Bolotova V. P. Features of wear of cylinder liners of marine medium-speed diesel engines..... 1088

Ukolov A. I., Rodionov V. P. Simulation of cavitating jet outflow onto biofouling of shipbuilding steel surface..... 1096

Kuznetsov R. V., Olkhovik E. O. Experimental study of the thermophysical properties of bimetallic bearing materials for marine engineering..... 1107

SHIP POWER PLANTS, SYSTEMS AND DEVICES..... 1115

Gerasimov N. I., Grachev I. V., Zhukov V. A. The influence of serial shipbuilding on the complexity of the power equipment installation..... 1115

Zhelezniak A. A., Yenivatov V. V., Dorovskoy V. A. Problem of ship power equipment diagnostic 1123

Medvedev G. V., Gorlova N. N. The issue state and options for reducing harmful emissions of diesel marine power plants..... 1133

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.

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
scientific leader 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
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
M. A. Kolosov,
doctor of technical Sciences
Ye. A. Koroleva,
doctor of economic Sciences
I. I. Kostylev,
doctor of technical Sciences
A. L. Kuznetsov,
doctor of technical Sciences
S. Ye. Kuznetsov,
doctor of technical Sciences
Ye. A. Lavrentyeva,
doctor of economic Sciences
V. A. Loginovskiy,
doctor of technical Sciences
V. Ye. Marley,
doctor of technical Sciences
A. M. Nikitin,
doctor of technical Sciences
T. A. Pantina,
doctor of economic Sciences
L. I. Pogodayev,
doctor of technical Sciences
V. I. Reshnyak,
doctor of technical Sciences
V. V. Romanovskiy,
doctor of technical Sciences
A. V. Saushev,
doctor of technical Sciences
S. V. Smolentsev,
doctor of technical Sciences
A. L. Stepanov,
doctor of technical Sciences
M. V. Sukhoterin,
doctor of technical Sciences
Ye. G. Trunin,
candidate of economic Sciences
A. L. Tezikov,
doctor of technical Sciences
V. B. Chistov,
doctor of technical Sciences

ELECTRICAL EQUIPMENT AND SYSTEMS..... 1141

Vu V. M., Chernov B. B., Nugmanov A. M. Efficiency evaluation
of a cathodic protection device for marine structures using power
from solar panels..... 1141

Mahmood S. N., Abdalgbar O. J., Solomin E. V. The impact of region
nature on wind turbine power production..... 1152

ЭКСПЛУАТАЦИЯ ВОДНОГО ТРАНСПОРТА, СУДОВОЖДЕНИЕ

DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-6-977-986

THE APPROACH TO THE FORMATION OF AN INTELLIGENT SYSTEM OF TRANSPORT AND LOGISTICS INFORMATION

Yu. M. Iskanderov¹, S. V. Rudykh², A. E. Pelevin³

¹ — St. Petersburg Institute for Informatics and Automation of Russian Academy of Sciences (SPIIRAS), St. Petersburg, Russian Federation

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

³ — Concern CSRI Elektropribor, JSC, St. Petersburg, Russian Federation

The development of the latest information technologies allows us to qualitatively change and increase the efficiency of modern transport and technological processes. There is a real opportunity for the accumulation and use of information resources in the interests of forming a single information space of the logistics system. The features of the subject area of the functioning the transport and technological processes are noted in the paper. It is noted that a serious obstacle is the low efficiency of organizational, technical, information and software interaction of participants in these processes. As an illustrative example, the existence of perennial unresolved problems in the implementation of the interaction of domestic seaports and railways is given. It is shown that to ensure the effectiveness of these processes, it is necessary to use integrated information systems to implement modern requirements to reduce operating costs and improve the quality of transport services. To create an integrated information system, it is proposed to use an approach using multi-agent technologies that will radically modernize the organization of processes in logistics systems. The possibilities of the proposed approach are described, the elements of logistic business processes as intellectual agents are interpreted. Substantial information resources, that form the agent platforms of applied and system services of the intellectual system of transport and logistic information, as well as constitute the databases and knowledge bases about transport and technological processes, are presented. A generalized structure of an intelligent system of transport and logistics information, presented using a multi-agent approach, is given. It is proposed that further research will focus on creating software agents that implement applied and system services of an intelligent system of transport and logistics information, on forming appropriate agent platforms, on developing ontologies characterizing the features of transport and technological processes, as well as on constructing the effective coordination and communication procedures for program agents.

Keywords: transport and technological process, informational resources, logistic system, integrated information system, multi-agent technology, software agent, agent platform, database, knowledge base, decision making.

For citation:

Iskanderov, Yuri M., Sergey V. Rudykh, and Alexander E. Pelevin. "The approach to the formation of an intelligent system of transport and logistics information." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admiral S. O. Makarova* 11.6 (2019): 977–986. DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-6-977-986.

УДК: 004.89:656.078

ПОДХОД К ФОРМИРОВАНИЮ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СИСТЕМЫ ТРАНСПОРТНО-ЛОГИСТИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ

Ю. М. Искандеров¹, С. В. Рудых², А. Е. Пелевин³

¹ — Санкт-Петербургский институт информатики и автоматизации Российской академии наук (СПИИРАН), Санкт-Петербург, Российская Федерация

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

³ — АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», Санкт-Петербург, Российская Федерация

Отмечается, что развитие новейших информационных технологий позволяет качественно изменить и повысить эффективность современных транспортно-технологических процессов. Появляется реальная возможность накопления и использования информационных ресурсов в интересах формирования единого информационного пространства логистической системы. В статье рассмотрены особенности предметной области функционирования транспортно-технологических процессов. Отмечается, что серьезным препятствием является низкая эффективность организационного, технического, информационного и программного обеспечения взаимодействия участников указанных процессов. В качестве показательного примера приведено существование многолетних нерешенных проблем при реализации взаимодействия отечественных морских портов и железных дорог. Показано, что для обеспечения эффективности указанных процессов необходимо использовать интегрированные информационные системы, позволяющие реализовать современные требования по снижению эксплуатационных затрат и повышению уровня качества транспортных услуг. Для формирования интегрированной информационной системы предложено использовать подход с использованием мультиагентных технологий, которые позволят кардинальным образом модернизировать организацию процессов в логистических системах. Изложены возможности предложенного подхода, дана интерпретация элементов логистических бизнес-процессов как интеллектуальных агентов. Представлены содержательные информационные ресурсы, формирующие агентные платформы прикладных и системных сервисов интеллектуальной системы транспортно-логистической информации, а также составляющие базы данных и знаний о транспортно-технологических процессах. Дана обобщенная структура интеллектуальной системы транспортно-логистической информации, представленная с использованием мультиагентного подхода. Предложено дальнейшие исследования направить на реализацию следующих целей: создание программных агентов, реализующих прикладные и системные сервисы интеллектуальной системы транспортно-логистической информации; формирование соответствующих агентных платформ; разработку онтологий, характеризующих особенности транспортно-технологических процессов, а также на построение эффективных процедур координации и коммуникации программных агентов.

Ключевые слова: транспортно-технологический процесс, информационные ресурсы, логистическая система, интегрированная информационная система, мультиагентная технология, программный агент, агентная платформа, база данных, база знаний, принятие решений.

Для цитирования:

Искандеров Ю. М. Подход к формированию интеллектуальной системы транспортно-логистической информации / Ю. М. Искандеров, С. В. Рудых, А. Е. Пелевин // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2019. — Т. 11. — № 6. — С. 977–986. DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-6-977-986.

Введение (Introduction)

Эффективное функционирование современных транспортно-технологических процессов (ТТП) невозможно представить без постоянного использования новейших информационных технологий. Возможности быстрого реагирования на нужды рынка и активный информационный обмен между звеньями транспортной сети являются неотъемлемой характеристикой поставок товаров любого рода. Программные комплексы и информационные системы, созданные для планирования и поддержки принятия различных коммерческих решений, являются ключевым фактором для обеспечения высокого качества обслуживания и постоянного совершенствования транспортных операций. С развитием интернет-технологий очевидным становится тот факт, что перспективные направления развития рынка логистических услуг ориентированы на активное использование электронных форм обеспечения ТТП [1], [2].

Исторически сложилось так, что накопление и использование информационных ресурсов (ИР) осуществлялось отдельно в каждом виде транспорта с целью обеспечения его эффективного управления и функционирования. Аналогично ситуация складывалась в других сферах логистики. Традиционно применение различных информационных технологий в логистических системах происходило разрозненно, только в интересах конкретного участника ТТП и с течением времени стало очевидно, что такой подход неэффективен и чрезвычайно важна интеграция ИР для получения единого информационного пространства (ЕИП) транспортно-логистической сети, поскольку ЕИП обеспечит необходимые скорости и объемы обмена информацией, а также предоставит наиболее точные данные, требуемые пользователю, позволит детально анализировать техни-

ко-экономические параметры различных вариантов, моделировать различные процессы с целью принятия оптимальных решений [1], [2]. Однако интеграция ИР в транспортной логистике является чрезвычайно сложной проблемой. По мере развития интеграционных процессов возникают более актуальные проблемы оптимизации и организации информационных потоков, что, безусловно, связано с особенностями предметной области ТТП:

- высокий динамизм предметной области;
- сложность получения полной, точной и достоверной информации;
- стрессовый характер ситуаций;
- дефицит времени принятия решений;
- сбои, отказы и выходы из строя технических средств;
- высокая вероятность ошибочных действий людей;
- форс-мажорные обстоятельства.

Значительным препятствием также является низкая эффективность организационного, технического, информационного и программного обеспечения взаимодействия участников ТТП. Характерным примером является существование многолетних нерешенных проблем при реализации взаимодействия отечественных морских портов и железных дорог. Достигнутый уровень корпоративного управления ОАО «РЖД» позволяет применять новые технологии транспортного сервиса, в том числе мониторинга движения и переработки грузов по выбранному маршруту и оптимизации процедур промежуточной обработки и хранения грузов. Однако «узким местом» при доставке международных грузов является подача и выгрузка вагонов в морском порту, а также простой вагонов на предпортовых железнодорожных станциях. Использование механизма ответственности при невыполнении заключенных договоренностей в виде наложения штрафов за несвоевременную подачу и выгрузку вагонов в морских портах, а также за простои вагонов и за «брошенные» поезда не обеспечило желаемого результата.

Сутью проблемы по-прежнему остается различие интересов участников данного ТТП. Каждый субъект ориентируется на достижение своих целей, связанных с непониманием системного эффекта от взаимодействия, действует в рамках своего правового, экономического и технологического пространства, оценивает эффективность своего функционирования по типовым критериям и показателям. Таким образом, учитывая системный характер проблемы, очевидно, что ее решение заключается в разработке и реализации на основе единой методологии комплекса согласованных мероприятий правового, организационного, финансово-экономического, методического, информационного и технологического характера, учитывающих интересы всех участников ТТП. Для обеспечения эффективности указанных процессов необходимо использовать интегрированные информационные системы (ИИС), позволяющие реализовать современные требования по снижению эксплуатационных затрат и повышению уровня качества транспортных услуг [1]–[4]. В этих условиях указанные системы позволяют эффективно решать основную логистическую задачу при организации ТТП, а именно согласование режимов производства и потребления с сервисным режимом предоставления транспортных средств, пограничной и таможенной обработкой, хранением, переработкой и распределением продукции. На базе ИИС появляется возможность построить ЕИП, которое обеспечит координацию работ всех организаций при осуществлении интермодальных перевозок в соответствии с принятой логистикой обработки грузов. Для поддержания ЕИП ИИС должна обеспечивать взаимодействие с корпоративными инфотелекоммуникационными системами различных транспортных и других организаций внутри страны и за рубежом.

Методы и материалы (Methods and Materials)

Поскольку в логистических системах используются различные телекоммуникационные, коммутационные, сетевые и информационные технологии, процессы контроля и управления ТТП резко усложняются. В этих условиях все большее значение приобретает интеллектуализация управления ТТП, стратегия которой заключается в разработке и внедрении эффективных информационных технологий, обеспечивающих в реальном масштабе времени замкнутость циклов

организационного и технологического управления, существенно повышающих обоснованность и согласованность принимаемых должностными лицами решений по управлению ТТП. Анализ указанной сложной и важной проблемы показывает, что такими технологиями являются технологии мультиагентных систем [1]–[8], [10].

Мультиагентный подход, положенный в основу формирования ИИС, позволит кардинальным образом модернизировать организацию ТТП. Ожидаемым результатом такого подхода является высокая эффективность, гибкость и надежность функциональных подсистем и их системы управления в целом, способность обеспечить высокий уровень качества логистических услуг, и как следствие, высокую конкурентоспособность на отечественном и мировом рынках. Отличительной особенностью мультиагентных технологий является реализация в информационных системах распределенных способов обработки информации.

В современном представлении агент — это программная система, которая имеет следующие особенности: автономность, взаимодействие, мобильность, реактивность, активность, индивидуальность видения «мира», коммуникабельность и кооперативность, интеллектуальность поведения. С точки зрения объектно-ориентированного подхода агент представляет собой определенный комплекс функций в совокупности с интерфейсом, способный поддерживать диалоговое общение. Поскольку задачи функционирования ТТП требуют распределенного и параллельного решения, необходима разработка и применение методов кооперации, координации и коммуникации агентов в процессе их решения, тем самым обеспечивается совместное решение единой задачи, распределенной по многим узлам логистической сети с использованием достаточно простых в отдельности программных единиц, реализующих сложные механизмы взаимодействия, которое определяется двусторонними и многосторонними динамическими отношениями между агентами.

Результаты (Results)

Рассмотрим возможности предложенного подхода. Информационное обеспечение логистической системы базируется на двух основных положениях: представление ТТП в виде совокупности взаимосвязанных бизнес-процессов; формирование ЕИП для интеграции бизнес-процессов и поддерживающей их инфраструктуры при помощи набора безопасных, стандартизованных компонентов — прикладных сервисов, которые могут многократно использоваться и комбинироваться для адаптации к изменениям на транспортном рынке. Для эффективной организации такой интеграции сначала необходимо разбить ТТП на функциональные блоки, а затем выполнить их декомпозицию до получения сквозных бизнес-процессов, сквозных бизнес-процессов — до получения отдельных бизнес-процессов, а отдельных бизнес-процессов — до составляющих их бизнес-функций как шагов бизнес-процесса. Бизнес-функция, дающая конкретный измеримый результат, является минимальной сущностью, имеющей ценность для осуществления бизнес-процесса. Именно она и является прикладным сервисом. Определим прикладной сервис как логическое представление физических, информационных и человеческих ресурсов, реализующее бизнес-функцию и обладающее следующими свойствами:

- является повторно используемым;
- определяется одним или несколькими явными технологически-независимыми интерфейсами;
- слабо связан с другими подобными ресурсами и может быть вызван посредством коммуникационных протоколов, обеспечивающих возможность взаимодействия ресурсов между собой.

Очевидно, что определенный таким образом прикладной сервис представляет собой не что иное, как «интеллектуальный агент» [5]–[7], [9]. Бизнес-функция, которую реализует данный прикладной сервис, должна быть однозначно описана в соответствии с определенными, принятыми для всех сервисов, правилами (также должны быть описаны набор и типы входных и выходных данных). Причем для внешних по отношению к прикладному сервису информационных систем не должно иметь значения, на каком языке программирования он реализован, на какой программно-аппаратной платформе функционирует, локально или удаленно расположен.

Кроме прикладных сервисов, информационное обеспечение должно располагать набором системных сервисов, обеспечивающих передачу / получение данных, сообщений, документов; информационное взаимодействие участников ТТП; работу с общими ресурсами и т. д. Указанные системные сервисы могут реализовать агенты, обеспечивающие выполнение максимально стандартизованных функций:

- ведение каталогов (реестров) прикладных сервисов;
- электронный обмен данными, сообщениями;
- распределенное копирование и хранение данных;
- защита информации и обеспечение прав доступа к ней;
- формирование отчетов и др.

В составе ИИС должны быть и общие ИР в виде специализированных баз данных и знаний (БДЗ), поддерживающих административные процедуры, и прогрессивные транспортно-технологические схемы. Эти БДЗ позволят обеспечить комплексирование различных ресурсов для решения конкретной задачи, создание вторичных ИР и унификацию массово используемых ИР. В первую очередь, процесс создания указанных БДЗ должен быть связан с формализацией нормативно-правовой, учетно-статистической и прогнозно-аналитической информации, а также с применением «электронных образов» различных процедур и «электронных реестров» участников и объектов ТТП.

Обсуждение (Discussion)

Специализированные БДЗ должны содержать следующую информацию:

1. *Характеристика участников ТТП.* Запись данных об участниках перевозки осуществляется на основе их регистрации. Основанием для регистрации является заключение договора, контракта, соглашения, предварительная или окончательная заявка на транспортные услуги. При любом повторном обращении следует указывать идентификационный номер регистрации.

2. *Описание пунктов отправления и пунктов назначения.* В качестве источника информации, например, возможно использование кодов и наименования пунктов отправления и прибытия в соответствии с Рекомендацией № 16 ЕЭК ООН «Коды портов и других пунктов назначения LOCODE».

3. *Описание маршрутов следования и тарифных участков.* ИР содержат описание вариантов маршрутов перемещения грузов между пунктами, ограничивающими участки видов транспорта, их подразделений с указанием тарифов, фрахтов (времени (сроков) перемещения) и условий перевозки. Эти данные могут быть получены от участников ТТП.

4. *Описание грузов.* Данные о грузах могут быть приведены в соответствии с гармонизированной номенклатурой HS / NHM и тарифной номенклатурой, применяемой участниками ТТП, а также из реализуемых заявок во взаимосвязи с пунктом отправления, отправителем и основными условиями перевозки.

5. *Описание транспортных средств и ресурсов.* ИР о морских и речных судах, поездах, автомобилях, причалах, складах, терминалах и т. п. Эта информация может быть предоставлена участниками ТТП. Состав данных определяется интересами логистической системы.

6. *Описание транспортного оборудования и упаковки.* ИР о контейнерах всех размеров и видов, трейлерах, обменных поддонах, другом оборудовании, а также упаковке для грузовых единиц (грузовых мест). Обязательно указываются характеристики подвижного состава, контейнеров и трейлеров по их типам и размерам, а упаковок — по их типам (видам). Кроме того, должны быть сформированы система идентификации и определения принадлежности.

7. *Описание видов перевозок, тарифов, фрахтов, платежей, сборов и затрат на перевозки.* Необходимо использовать классификацию INCOTERMS, виды тарифов и фрахтов, применяемых участниками ТТП, а также виды платежей, сборов и затрат на транспортно-логистические услуги.

8. *Описание специальных условий перевозки грузов:* ИР об условиях перевозки грузов с превышением габарита и массы; об условиях перевозки опасных грузов, с указанием категории опасности, маркировки и т.д.; о требованиях к охране и сопровождению грузов.

9. *Перечень и описание услуг, оказываемых в пути следования и при доставке к месту назначения:* ИР о составе, структуре, процедурах выполнения транспортно-логистических услуг, с указанием содержания и особенностей их выполнения.

На основе БДЗ интегрированные информационные системы обеспечивают решение следующих основных задач:

1. *Выбор и оптимизация маршрута перевозки грузовой отправки.* Выбор и оптимизация маршрута перевозки грузовой отправки осуществляются по заявке отправителя груза (или лица его заменяющего) на основе информации, содержащейся в БЗД и в соответствии с условиями, указанными в заявке отправителя. Для выбора и оптимизации маршрута рассматриваются участки и пункты видов транспорта, транспортные предприятия — участники ТТП. Выбор и оптимизация маршрута могут выполняться как для отдельной грузовой отправки, так и для регулярных перевозок серии отправок, технологических, сезонных и других перевозок, имеющих постоянный, регулярный характер. Расчет оптимизации маршрута перевозки может осуществляться по следующим критериям:

- минимальной суммарной стоимости перевозки;
- минимизации сроков доставки груза;
- минимальному количеству погрузочно-разгрузочных операций, перевалки и перегруза;
- надежности и регулярности доставки груза в согласованные сроки к месту потребления;
- другим критериям, задаваемым отправителем или получателям груза.

2. *Организация резервирования выполнения логистических процедур и ресурсов транспорта.*

Задача предусматривается в тех случаях, когда возможно скопление грузовых отправок в ожидании выполнении логистической операции (например, в ожидании перевалки груза в порту, перегруза на границе железных дорог с одной колеи на другую, вывоза со склада и т. п.) для обеспечения высокой точности срока доставки (например, поездом, следующим строго по графику), когда ограничены ресурсы на определенном участке перевозки (например, паромная переправа), а также для других подобных ситуаций, которые должны быть согласованы с участниками логистической системы.

Объектами резервирования могут быть:

- места на морском или речном судне, пароме;
- места (вагоны, контейнера, трейлеры) в составе поезда, следующего по жесткому графику;
- автомобили, трейлеры, автомобильные поезда;
- транспортное оборудование (специальные вагоны, контейнеры, трейлеры и т. п.);
- места на складах, сортировочных платформах, терминалах, причалах;
- очередь для проведения операций по перегрузу, перевалке;
- очередность выполнения операции по обслуживанию в пути следования;
- другие подобные объекты, согласованные участниками реализации логистических цепочек.

Осуществление резервирования предусматривает выполнение операций по заявке и согласованию этой операции с партнерами путем информационного обмена и фиксирования результатов. Выбор объектов, для которых следует выполнять процедуру резервирования, определяется при заключении соглашения по перевозкам. Также фиксируются условия и параметры резервирования, которые должны быть заложены в ИИС и доступны участникам ТТП. Зарезервированный порядок выполнения процедур должен иметь безусловный приоритет.

3. *Расчет логистических цепочек с учетом коммерческих, эксплуатационных, таможенных и пограничных процедур и дополнительных услуг.* Данный вид расчета осуществляется для каждой отправки груза. Возможно укрупнение для группы однородных отправок, а также повторное использование расчетов для аналогичной ситуации. Он включает последовательность выполнения операций и перемещений по маршруту перевозки, их продолжительность и стоимость с учетом резервирования и очередности.

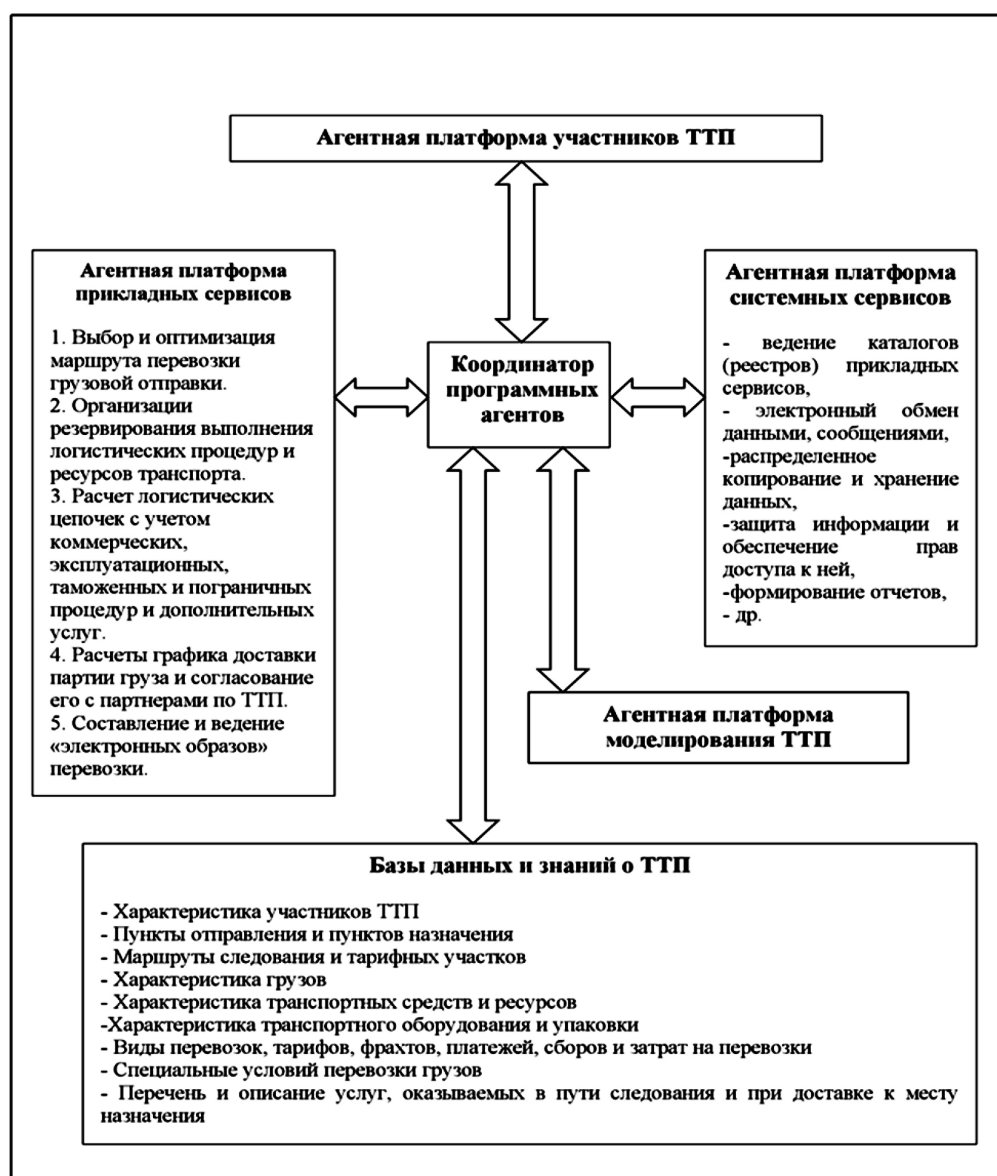
4. *Расчет графика доставки партии груза и согласование его с партнерами по ТТП.* График доставки партии груза разрабатывается на основе расчета логистической цепочки и содержит время, даты, периоды выполнения процедур и перемещений с привязкой к календарному отсчету

от момента отправления отправки и к пунктам (местоположению) выполнения операций, начала и конца перемещения на участке.

Примечание. Результаты расчета логистической цепочки и графика (пп. 3 и 4) после согласования с операторами перевозки должны быть сформированы в виде «электронного образа» и направлены партнерам для исполнения и контроля. Согласованная логистическая цепочка и график доставки партии груза при определенных условиях могут рассматриваться как неотъемлемая часть договора между участниками ТТП.

5. *Составление и ведение «электронных образов» перевозки.* Формирование «электронного образа» перевозки осуществляется по мере поступления документов и входных сообщений в соответствии с заданным регламентом. Источником для формирования «электронного образа» перевозки являются также БДЗ и результаты выбора маршрута следования, расчета логистических цепочек и графика доставки партии груза. Указанному «электронному образу» присваивается уникальный идентификационный номер. Все операции, процедуры, события в пути и по прибытию, которые следует учитывать при перевозке, должны быть «привязаны» к соответствующему идентификационному номеру.

На схеме дана обобщенная структура интеллектуальной системы транспортно-логистической информации, представленная с использованием мультиагентного подхода.



Обобщенная структура интеллектуальной системы транспортно-логистической информации

Взаимодействие агентных платформ в процессе функционирования ИИС осуществляется координатором программных агентов. Каждый сервис, прикладной или системный, реализуется соответствующим программным агентом. Корректное использование БДЗ обеспечивает программный агент — менеджер онтологий. Информационный обмен контролирует коммуникатор программных агентов. Необходимо отметить, что в отдельных случаях процесс выбора маршрутов доставки может предусматривать использование средств моделирования, поэтому в структуру введена агентная платформа моделирования ТТП.

Выводы (Summary)

Ключевыми особенностями проектирования и реинжиниринга информационных систем, обеспечивающих решение комплекса задач транспортной логистики, являются: интеграция информационных ресурсов, многовариантность построения бизнес-процессов и эффективное моделирование функционирования сетевых организаций. Формирование интеллектуальной системы транспортно-логистической информации на основе мультиагентных технологий позволит создать действенный инструмент, обеспечивающий достижение высокого уровня качества и конкурентоспособности предоставляемых транспортных услуг. Использование указанной системы позволит:

- динамически перестраивать структуру взаимодействия ИР в зависимости от внешних и внутренних условий функционирования ТТП;
- инкапсулировать ранее разработанные средства и программы в интегрированную среду;
- унифицировать программное обеспечение, используемое участниками ТТП;
- обеспечить вхождение в международное информационное пространство с целью развития электронных и мобильных услуг.

Дальнейшие исследования необходимо направить на создание программных агентов, реализующих прикладные и системные сервисы интеллектуальной системы транспортно-логистической информации, формирование соответствующих агентных платформ, разработку онтологий, характеризующих особенности ТТП, а также на построение эффективных процедур координации и коммуникации программных агентов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Искандеров Ю. М.* Организация транспортно-технологических процессов на основе интегрированных информационных систем / Ю. М. Искандеров, В. И. Дорошенко // «Новая экономика» и основные направления ее формирования: сб. ст. Междунар. науч.-практ. конф.; под общ. ред. А. В. Яковлевой. — СПб.: СПбПУ Петра Великого, 2016. — С. 53–62.
2. *Лукинский В. С.* Проблемы и перспективы использования интеллектуальных информационных технологий в логистических системах / В. С. Лукинский, Ю. М. Искандеров, Б. В. Соколов, А. Г. Некрасов // Информационные технологии в управлении (ИТУ–2018): материалы конф. — СПб.: АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», 2018. — С. 80–89.
3. *Искандеров Ю. М.* Мультиагентные системы для управления логистическими функциями в цепях поставок / Ю. М. Искандеров // Логистика: современные тенденции развития: материалы XVIII Междунар. науч.-практ. конф. — СПб.: ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова, 2019. — С. 219–221.
4. *Искандеров Ю. М.* Построение моделей интегрированной информационной системы транспортной логистики на основе мультиагентных технологий / Ю. М. Искандеров // «Новая экономика» и основные направления ее формирования: сб. ст. Междунар. науч.-практ. конф.; под общ. ред. А. В. Яковлевой. — СПб.: СПбПУ Петра Великого, 2016. — С. 62–69.
5. *McFarlane D.* Intelligent logistics: Involving the customer / D. McFarlane, V. Giannikas, W. Lu // Computers in Industry. — 2016. — Vol. 81. — Pp. 105–115. DOI: 10.1016/j.compind.2015.10.002.
6. *Wooldridge M.* An Introduction to Multi-Agent Systems / M. Wooldridge. — John Wiley & Sons, 2009. — 368 p.
7. *Leitão P.* Recent developments and future trends of industrial agents / P. Leitão, P. Vrba // International Conference on Industrial Applications of Holonic and Multi-Agent Systems. — Springer, Berlin, Heidelberg, 2011. — Pp. 15–28. DOI: 10.1007/978-3-642-23181-0_2.

8. Скобелев П. О. Мультиагентные технологии для управления распределением производственных ресурсов в реальном времени / П. О. Скобелев [и др.] // Механика, управление и информатика. — 2011. — № 5. — С. 110–122.

9. Скобелев П. О. Интеллектуальные системы управления ресурсами в реальном времени: принципы разработки, опыт промышленных внедрений и перспективы развития / П. О. Скобелев // Информационные технологии. — 2013. — № S1. — С. 1–32.

10. Городецкий В. И. Многоагентные технологии для индустриальных приложений: реальность и перспектива / В. И. Городецкий, П. О. Скобелев // Труды СПИИРАН. — 2017. — № 6 (55). — С. 11–45. DOI: 10.15622/sp.55.1.

REFERENCES

1. Iskanderov, Yu. M., and V. I. Doroshenko. “Organizatsiya transportno-tekhnologicheskikh protsessov na osnove integrirovannykh informatsionnykh system.” *«Novaya ekonomika» i osnovnye napravleniya ee formirovaniya. Sbornik statei Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii*. Edited by A. V. Yakovleva. SPb.: Sankt-Peterburgskii politekhnicheskii universitet Petra Velikogo, 2016. 53–62.

2. Lukinskii, V. S., Yu. M. Iskanderov, B. V. Sokolov, and A. G. Nekrasov. “Problemy i perspektivy ispol'zovaniya intellektual'nykh informatsionnykh tekhnologii v logisticheskikh sistemakh.” *Informatsionnye tekhnologii v upravlenii (ITU-2018): materialy konferentsii*. SPb.: AO «Kontsern «TsNII «Elektropribor», 2018. 80–89.

3. Iskanderov, Yu. M. “Mul'tiagentnye sistemy dlya upravleniya logisticheskimi funktsiyami v tsepyakh post-avok.” *Logistika: sovremennye tendentsii razvitiya: Materialy XVIII Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii*. SPb.: Gosudarstvennyi universitet morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova, 2019. 219–221.

4. Iskanderov, Yu. M. “Postroenie modelei integrirovannoi informatsionnoi sistemy transportnoi logistiki na osnove mul'tiagentnykh tekhnologii.” *«Novaya ekonomika» i osnovnye napravleniya ee formirovaniya: Sbornik statei Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii*. Edited by A. V. Yakovleva. SPb.: Sankt-Peterburgskii politekhnicheskii universitet Petra Velikogo, 2016. 62–69.

5. McFarlane, Duncan, Vaggelis Giannikas, and Wenrong Lu. “Intelligent logistics: Involving the customer.” *Computers in Industry* 81 (2016): 105–115. DOI: 10.1016/j.compind.2015.10.002.

6. Wooldridge, M. *An Introduction to Multi-Agent Systems*. John Wiley & Sons, 2009.

7. Leitão, Paulo, and Pavel Vrba. “Recent developments and future trends of industrial agents.” *International Conference on Industrial Applications of Holonic and Multi-Agent Systems*. Springer, Berlin, Heidelberg, 2011. 15–28. DOI: 10.1007/978-3-642-23181-0_2.

8. Skobelev, Petr Olegovich, Anton Vladimirovich Ivaschenko, Michael Vladimirovich Andreev, and Ivan Olegovich Babanin. “Multi-agent technology for real time manufacturing resources management.” *Mechanics, Control and Informatics* 5 (2011): 110–122.

9. Skobelev P. O. “Intelligent Systems for Real Time Resource Management: Principles, Experience and Perspectives.” *Information Technologies* S1 (2013): 1–32.

10. Gorodetsky, Vladimir Ivanovich, and Petr Olegovich Skobelev. “Industrial applications of multi-agent technology: reality and perspectives.” *SPIIRAS Proceedings* 6(55) (2017): 11–45.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Искандеров Юрий Марсович —

доктор технических наук, профессор
Санкт-Петербургский институт информатики
и автоматизации Российской академии наук
199178, Российская Федерация, Санкт-Петербург,
14-я линия В.О., 39
e-mail: iskanderov_y_m@mail.ru

Рудых Сергей Витальевич —

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

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Iskanderov, Yurii M. —

Dr. of Technical Sciences, professor
St. Petersburg Institute for Informatics
and Automation of the Russian Academy of Sciences
39 14th Linia VI Str., St. Petersburg, 199178,
Russian Federation
e-mail: iskanderov_y_m@mail.ru

Rudykh, Sergey V. —

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

Пелевин Александр Евгеньевич —
доктор технических наук,
ведущий научный сотрудник
АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор»
197046, Российская Федерация, Санкт-Петербург,
ул. Малая Посадская, 30
e-mail: apelevin@eprib.ru

Pelevin, Alexander E. —
Dr. of Technical Sciences,
Leading Researcher
Concern CSRI Elektropribor, JSC
30, Malaja Posadskaja Str., St. Petersburg,
197046, Russian Federation
e-mail: apelevin@eprib.ru

*Статья поступила в редакцию 8 ноября 2019 г.
Received: November 8, 2019.*

DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-6-987-1002

RISKS ASSESSMENT OF APPLYING UNMANNED MEANS OF WATER TRANSPORT IN THE WATER AREA

V. V. Karetnikov, S. V. Kozik, A. A. Butsanets

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

The range of dangers and associated risks, when introducing unmanned means of water transport are discussed in the paper. The phased introduction of vessels with various degree of autonomy (from “smart vessels” with a traditional crew on board to completely unmanned vessels), their simultaneous operation creates a situation of transformation of already explored in the scientific literature hazards for the navigation safety, as well as the emergence of new dangers associated with operational features of autonomous systems of unmanned ships, the use of new innovative technologies. An approach to the systematization of dangers and an assessment of their risk, which is advisable to use when analyzing new solutions, which include unmanned means of water transport is proposed. It includes two qualitative assessments: the risks of operating unmanned means of water transport and the risks of using new technologies when creating autonomous systems of unmanned means of water transport. For the first case, a model approach is used that considers autonomous vessels as models of systems. The following enlarged models are distinguished: on-board autonomous systems, control center system and water area system. Such implementing the model approach, the several groups of functions that cover all aspects of operations on the vessel are identified: the voyage route, navigation during the voyage, detection of navigational and environmental conditions of shipping, safety of navigation and emergencies, vessel safety, hull strength, passenger management, cargo management, technical infrastructure. To assess the risk of applying new technologies, it is proposed to use the following factors: the degree of reliability of used technology and the level of technology autonomy. The range of methods of risk analysis includes 31 methods. The choice of analysis methods depends on a sufficiently large number of factors. At the present stage of development of unmanned ship systems, it is possible to obtain a qualitative risk assessment. The following methods are noteworthy: HAZOP hazard and operability studies, FMEA failure modes and consequences analysis, «bow-tie» analysis. The ALARP principle is applied to present the results of the analysis of the risk matrix.

Keywords: risks assessment, unmanned means of water transport, systematization of dangers, operating unmanned systems, HAZOP, FMEA, «bow-tie» analysis, ALARP principle.

For citation:

Karetnikov, Vladimir V., Sergey V. Kozik, and Artem A. Butsanets. “Risks assessment of applying unmanned means of water transport in the water area.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 11.6 (2019): 987–1002. DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-6-987-1002.

УДК 656.621

К ВОПРОСУ ОЦЕНКИ РИСКОВ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ БЕЗЭКИПАЖНЫХ СРЕДСТВ ВОДНОГО ТРАНСПОРТА НА УЧАСТКЕ АКВАТОРИИ

В. В. Каретников, С. В. Козик, А. А. Буцанец

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

В статье рассмотрен ряд опасностей и связанных с ними рисков при внедрении безэкипажных средств водного транспорта. Постепенно на водных объектах вводятся в эксплуатацию суда с различной степенью автономности (от «умных судов» с наличием на борту традиционного экипажа до полностью безэкипажных судов). Одновременная эксплуатация автономных и классических судов создает ситуацию трансформации уже исследованных в научной литературе опасностей плавания. Эта ситуация способствует появлению нового вида опасностей, связанных с особенностями эксплуатации автономных систем безэкипажных судов. В данной работе предложен подход к систематизации опасностей и оценке

их риска для использования его в процессе анализа новых решений, к которым можно отнести внедрение безэкипажных средств водного транспорта. Такой подход включает два вида качественной оценки риска: при эксплуатации безэкипажных средств водного транспорта и в случае применения новых технологий при создании автономных систем безэкипажных средств водного транспорта. В первом случае используется модельный подход, предполагающий способ рассмотрения автономных судов как модели систем. Выделяются следующие укрупненные модели: бортовые автономные системы, а также система центра управления и система акватории. При реализации модельного подхода выделены несколько групп функций, охватывающих все аспекты операций на судне, а именно: маршрут рейса, навигацию в ходе рейса, обнаружение навигационных и экологических условий плавания, безопасность плавания и чрезвычайные ситуации, безопасность судна, прочность корпуса судна, управление пассажирами, управление грузом и техническая инфраструктура. Для оценки риска применения новых технологий предложено использовать степень достоверности используемой технологии и уровня автономности технологии. Спектр методов анализа рисков включает 31 метод, выбор которых зависит от многих факторов. На современном этапе развития безэкипажных судовых систем возможно получение качественной оценки риска. Заслуживают внимания следующие методы: исследование опасности и работоспособности HAZOP, анализ видов и последствий отказов FMEA, анализ «галстук-бабочка». Для представления результатов анализа матрицы риска используется принцип ALARP.

Ключевые слова: оценка рисков, безэкипажные средства водного транспорта, систематизация опасностей, эксплуатация автономных систем, HAZOP, FMEA, анализ «галстук-бабочка», принцип ALARP.

Для цитирования:

Каретников В. В. К вопросу оценки рисков использования безэкипажных средств водного транспорта на участке акватории / В. В. Каретников, С. В. Козик, А. А. Буцанец // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2019. — Т. 11. — № 6. — С. 987–1002. DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-6-987-1002.

Введение (Introduction)

Развитие робототехники служит одной из предпосылок для создания автономных (безэкипажных) транспортных средств. Разработка и внедрение автономных судов относятся к новому направлению в науке и технике, способствующему росту активности научных, образовательных и производственных организаций отрасли. Предполагается, что автономные суда смогут обеспечить повышенную безопасность и эффективность перевозок, а также экономию средств за счет удаления человека из операций производственного цикла, что будет способствовать нивелированию негативной роли такого явления, как «человеческий фактор», повышению производительности труда и позволит реализовать на водном транспорте составную часть интеллектуальной транспортной системы. Кроме указанных ранее преимуществ, безэкипажные суда позволяют:

- упростить компоновку и архитектуру судна и как следствие снижение стоимости постройки и обслуживания судна;
- оптимизировать расходы на подготовку судовых специалистов;
- снизить уровень пиратства.

В увеличивающемся количестве изданий на тему «автономное судоходство», революционных цифровых технологий и цифровых преобразований в судоходстве отмечается тенденция оперирования «размытыми» определениями и «перекрывающимися» понятиями. Считается, что системы маломерных судов (до 24 м) достигли высокого уровня автоматизации [1], особенно в сфере судов с дистанционным управлением, а первые крупные автономные суда введут в эксплуатацию в ближайшие годы. Некоторыми исследованиями подтверждено, что автономные суда уже работают [2] и к 2022 г. в морской торговый флот могут быть введены крупные суда в качестве инструмента разведки на море или в научных целях с минимальным составом экипажа и без него [1], однако существует вероятность того, что эти действия могут отрицательно отразиться на безопасности судоходства [3]–[6]. Другие ученые видят «действующую автономную морскую экосистему» к 2025 г. [7]. Целесообразным является проявление некоторой осторожности в отношении экстраполяции этих разработок на глобальный флот с учетом значительных различий в характеристиках различных секторов и отраслей.

Появление автономных судов может встретить противодействие к их внедрению со стороны моряков и их профсоюзов [8], так как в проведенном исследовании 80 % моряков выразили обеспокоенность по поводу возможной потери работы с появлением автоматизации. Другим аспектом является проблема воздействия сокращенного экипажа на их психическое здоровье: с уменьшением количества людей на борту судна их функции будут выполняться автономными системами и, соответственно, физические требования к морякам уменьшатся, а умственные — возрастут. Это приведет к меньшему социальному взаимодействию между оставшимися членами экипажа и, как следствие, к одиночеству и, возможно, депрессии [9].

Внедрение безэкипажного судоходства требует определенных изменений в структуре флота, которые будут состоять из традиционных судов, обслуживаемых экипажами, и автономных (безэкипажных) судов. Такое сочетание будет способствовать трансформации уже исследованных в научной литературе опасностей для безопасности судоходства, а также появлению новых, связанных с особенностями эксплуатации автономных систем безэкипажных судов и применением новых технологий.

Целью настоящего исследования является определение путей систематизации возможных опасностей в процессе эксплуатации автономных судов, оценка связанных с ними рисков, а также выделение спектра используемых для этого методов анализа.

Методы и материалы (Methods and Materials)

В данном исследовании под автономным судном понимается «судно с датчиками, автоматизированной навигацией, двигательными и вспомогательными системами, логикой принятия решений для следования планам миссии, настройкой выполнения миссии и работы без вмешательства человека» [10]. Автономное судно может быть укомплектовано сокращенным экипажем или быть без экипажа (безэкипажное судно). Уровень автономности судна определяется, с одной стороны, в соответствии с основной ролью человека в праве принятия решения и, с другой стороны, в выполнении этой роли автоматизированными системами. Описания различных уровней автономности от обычного судна до полностью автономного судна приведены в табл. 1.

Оценка риска выполняется с различной степенью глубины и детализацией с использованием одного или нескольких методов разного уровня сложности. Форма оценки и ее выходные данные должны быть совместимы с критериями риска, установленными при определении области применения. Важно определить концептуальные соотношения между различными категориями методов оценки риска и существенными его факторами в конкретной ситуации и привести примеры выбора метода оценки риска для данного случая.

При выборе метода оценки риска необходимо учитывать:

- соответствие рассматриваемой ситуации и объекту;
- предоставление результатов в форме, способствующей повышению осведомленности о виде риска и способах его обработки;
- обеспечение наблюдений, воспроизводства и верификации процесса и результатов;
- учет ресурсных ограничений для выработки и реализации управляющих решений, связанных с тем, что временных, человеческих, информационных или материальных ресурсов, необходимых для обеспечения безопасности может быть недостаточно.

В отечественной практике при решении задач формализованной оценки безопасности (ФОБ) уже в течение длительного времени используются различные методы исследования рисков, а также их комбинации.

ФОБ — это рациональный и систематический подход к оценке рисков на транспорте. Ее цель — снизить величину рисков и оценить расходы и выгоды от решений, направленных на их снижение. Методы формализованной оценки безопасности позволяют создать прозрачный механизм принятия решений, являются превентивными, так как позволяют рассматривать потенциальные опасности до того, как произойдут серьезные аварии [11], [12].

Таблица 1

Категории судов и уровень автономности

Тип судна	Обычное судно	Судно с высокой степенью автоматизации управления		Автономное судно		
Уровни автономности	0	1		2	3	4
	Управляемый человеком	Направляемый человеком		Делегируемый человеком	Под контролем человека	Полностью автономный
Наличие экипажа	Да	Да / Нет		Да / Нет	Да / Нет	Нет
Метод управления	Автоматизированные или ручные операции находятся под контролем человека	Поддержка при принятии решения	Человек принимает Решения и действия	Человек должен подтвердить решения	Система не ожидает подтверждения. Человек всегда информирован о решениях и действиях	Система не ожидает подтверждения. Человек информируется только в случае крайней необходимости
Ответственный за принятие решений	Человек	Человек		Человек	Программное обеспечение	Программное обеспечение
Действия совершаются	Человек	Человек		Система	Система	Система

Существуют традиционные алгоритмы оценки риска. Опыт применения различных инструментов анализа рисков нашел свое отражение в Международном стандарте ISO 31010 и его российском аналоге ГОСТ Р ИСО/МЭК 31010–2011 «Менеджмент риска. Методы оценки риска», которые представляют собой справочник основных «инструментов» исследования рисков. Для их систематизации возможно выделение следующих ключевых этапов оценки риска [13]–[15]:

- идентификация опасности;
- определение опасных событий;
- поиск и описание причин опасных событий;
- описание сценариев развития опасности и возможных последствий возникновения опасных событий;
- оценка критичности последствий и уровня риска;
- разработка рекомендаций (мер защиты или барьеров безопасности) по снижению риска за счет снижения вероятности реализации причин опасного события и / или снижение тяжести ущерба от реализации опасного события.

Под опасностью понимается источник потенциального вреда, а под опасным событием — такое событие, которое может причинить вред.

Обобщенный подход к исследованию рисков можно проиллюстрировать с помощью метода оценки риска — анализ «галстук-бабочка»¹. Среди методов оценки риска особое внимание необходимо обратить внимание [16], [17] на следующие факторы:

- исследование опасности и работоспособности (HAZOP)²;

¹ ГОСТ Р ИСО/МЭК 31010–2011. Менеджмент риска. Методы оценки риска. М.: Стандартинформ, 2012.

² ГОСТ Р 51901.11–2005. Менеджмент риска. Исследование опасности и работоспособности. Прикладное руководство. М.: Стандартинформ, 2006.

- анализ видов и последствий отказов (FMEA)^{1, 2, 3};
- анализ «галстук-бабочка» (Bow-Tie).

Оценка риска и технологии — это две качественные оценки, которые целесообразно использовать при анализе новых решений, к которым можно отнести безэкипажные средства водного транспорта. Цель этих оценок состоит в том, чтобы идентифицировать и снизить, насколько это практически возможно, риски, связанные с опасностями, возникающие при использовании безэкипажных средств водного транспорта (автономных судов).

При оценке риска используется модельный подход, рассматривающий автономные суда как модель следующих систем: бортовых автономных систем, систем центра, управления систем акватории.

Оценка риска должна выполняться в соответствии со следующими этапами:

- модель автономных судовых систем;
- модель систем центра управления;
- модель систем акватории;
- оценка используемых новых технологий;
- идентификация опасностей;
- анализ риска и связанный с ним результат;
- варианты контроля рисков для устранения недопустимых рисков.

На начальном этапе оценки риска использования безэкипажных средств водного транспорта при реализации модельного подхода выделены несколько групп функций, охватывающих все аспекты операций судна, а именно:

- маршрут рейса;
- навигация в ходе рейса;
- обнаружение навигационных и экологических условий плавания;
- безопасность плавания и чрезвычайные ситуации;
- безопасность судна, прочность корпуса судна;
- управление пассажирами;
- управление грузом;
- техническая инфраструктура.

Результаты (Results)

Модели систем и особенности эксплуатации безэкипажных средств водного транспорта. Безопасность автономных судов должна быть не ниже уровня обычного судна той же цели или конструкции. Для безопасной работы автономные суда не должны являться источником опасности для себя, других судов, инфраструктуры и окружающей среды.

Автономные суда должны быть способны:

- следовать по заранее подготовленному плану рейса с учетом обновления его в режиме реального времени;
- осуществлять навигацию в соответствии с заранее определенным маршрутом рейса во избежание столкновений с препятствиями или неожиданными объектами;
- поддержание достаточного уровня маневренности и устойчивости в различных морских состояниях
- выдерживать несанкционированное физическое или виртуальное вторжение.

Автономные суда не должны мешать связи между другими судами, работающими в их окрестностях. Однако автономные суда должны иметь возможность отвечать на любой обычный запрос (например, идентификация, местоположение) от других судов посредством радиосвязи или визуальных

¹ ГОСТ Р 51901.12–2007. Менеджмент риска. Метод анализа видов и последствий отказов. М.: Стандартиформ, 2017.

² ГОСТ Р 51814.2–2001. Системы качества в автомобилестроении. Метод анализа видов и последствий потенциальных дефектов. М.: Госстандарт России, 2002.

³ ГОСТ Р 51814.6–2005. Системы менеджмента качества в автомобилестроении. Менеджмент качества при планировании, разработке и подготовке производства автомобильных компонентов. М.: Стандартиформ, 2006.

сигналов. Портовые и прибрежные власти должны иметь возможность связываться с автономными судами, чтобы быть в курсе запланированных маневров и регулировать движение.

Такие суда должны быть спроектированы с учетом возможности присутствия человека на борту или вблизи них, разрешать человеку входить на борт для управления судном, например, в случае возникновения критической ситуации (пожар, наводнение, потеря тяги и др.). Независимо от возможности дистанционного управления автономные суда должны быть спроектированы так, чтобы ими можно было управлять на борту либо с помощью переносного устройства (например, ноутбука), либо с помощью встроенной системы управления. Возможность взять управление находящемуся на борту человеку должна предоставляться только уполномоченному персоналу.

Пассажир автономных судов должен иметь возможность активировать аварийную кнопку в случае критической ситуации (например, пассажир за бортом, препятствие во время стыковки). Две основные задачи, которые должны выполняться автономными судами для предотвращения столкновения в море:

- наблюдение с целью обеспечения постоянного мониторинга судов, используя соответствующую информацию, чтобы иметь полную оценку ситуации и риска столкновения
- оперативные решения: обязанность судов принимать решения об уклонении.

Автономные суда должны иметь возможность информировать другие суда о своем статусе и намерениях путем подачи специального светового сигнала или сообщения связи (например, AIS). Автономные суда должны иметь возможность связываться с другими судами для обмена информацией о намерении или необходимости изменения маршрута из-за риска столкновения. Эта сигнализация должна быть устойчивой к любым сбоям связи и в этом конкретном случае статус должен быть «не под командованием».

Эти суда должны быть в состоянии обеспечить получение сигналов бедствия и их передачу в соответствующие органы поиска и спасания. Должна быть предоставлена возможность автоматически контролировать выбросы в атмосферу и операции слива масла. Интегрированные автономные системы управления, управляются и / или контролируются оператором центра управления через спутниковые или наземные системы.

Модель систем судна. Системы должны быть спроектированы так, чтобы они были устойчивыми к отказам (например, отказоустойчивыми) и имели увеличенные интервалы технического обслуживания. Наивысшая надежность должна быть достигнута путем введения эффективных диагностических и прогностических алгоритмов для управления риском отказов и предварительного планирования операций технического обслуживания, которые должны выполняться в порту (например, с помощью технического обслуживания на основе условий). Для того, чтобы предотвратить сбои следует использовать интенсивный дистанционный мониторинг и контроль состояния оборудования. Частичное или полное резервирование являются определенными решениями для улучшения доступности критически важных систем, таких как инфраструктура связи. Для установления минимального уровня функциональности каждой автономной системы используется целевой подход, в соответствии которым выделяются системы, связанные с основными службами, участвующими в эксплуатации автономных судов, а именно: навигационной системой, бортовыми сетями и системами связи, машинным оборудованием, системой управления грузом, системой управления пассажирами.

Модель систем центра управления. Выделяются следующие системы: средства связи, средства контроля и мониторинга, средства комплектования личного состава. Несколько датчиков, используемых для мониторинга, значительно увеличивают объем информации, предоставляемой оператору. Во избежание риска перегрузки информации, которая может снизить точность реальной ситуации на судне, оператору следует предложить объединение данных, собранных датчиками.

Эргономика систем мониторинга должна учитывать бдительность человека, которая может быть снижена в течение длительных периодов дистанционного управления или в случае, когда несколько судов, находящихся в разных ситуациях, управляются только одним оператором.

Удаленный оператор должен знать о задержке связи, которая обусловлена несоответствием между его / ее действием и фактической реакцией судна. Задержка непрерывно должна отображаться во время операций (например, маневрирования) и должно выдаваться предупреждение в случае, когда задержка превышает предварительно определенные пределы.

Модель систем акватории. Наличие оцифрованных водных путей (акватории). Береговая инфраструктура взаимосвязана программно и аппаратно с движением безэкипажных судов.

Автономный мониторинг гидрологической и метеорологической обстановки. Правильное размещение груза на борту судна должно зависеть от операторов порта, поскольку у автономных судов недостаточно средств (меньшее количество членов экипажа и оборудования) для обеспечения надлежащего закрепления груза в море.

Оценка риска использования новых технологий. Оценка риска при использовании новых технологий зависит от следующих факторов:

- степени достоверности используемой технологии;
- уровня автономности технологии.

Степень достоверности технологии определяет вероятность сбоя (частоту) и / или последствия этого сбоя (влияние на серьезность). Чтобы увеличить или уменьшить возможный риск новой технологии, степень достоверности технологии должна быть оценена по уровню совершенства технологии и предлагаемым условиям эксплуатации (табл. 2).

Таблица 2

Степень достоверности технологии

Совершенство технологии	Условие применения	
	Соответствующее	Отличное
Доказанная	0	1
Ограниченные ссылки	1	2
Экстраполированная от проверенного	2	3
Новые	3	3

Уровень автономности технологии определяется по роли человека в реализации функций системы (табл. 3).

Таблица 3

Уровень автономности технологии

Уровень автономности	Содержание	Получение	Анализ	Решение	Действие
0 — управляет человек	Человек принимает все решения и контролирует все функции	Система, человек	Человек	Человек	Человек
1 — человек руководит	Система предлагает действия, человек принимает решения и действия	Система	Система, человек	Человек	Человек
2 — человек делегирует	Система вызывает функции, человек может отклонить решение в течение определенного времени	Система	Система	Система, человек	Человек

Таблица 3
(Окончание)

3 — под надзором человека	Система вызывает функции, не ожидая реакции человека	Система	Система	Система	Система человек
4 — полностью автономная	Система вызывает функции без информирования человека, за исключением экстренных случаев	Система	Система	Система	Система

Примечания:

1. При высоком уровне автономности преобладают системные ошибки.
2. При низком уровне автономности будут преобладать ошибки человеческого фактора.

Функции системы сформированы на основе модели обработки информации человеком, которая имеет четыре ступени:

- получение информации;
- анализ информации;
- выбор решения и действия;
- реализация действий.

Идентификация опасностей, виды рисков использования безэкипажных средств водного транспорта. Опасности для автономных судов соответствуют опасностям обычных судов (табл. 4), но, кроме того, новые опасности могут возникать из-за сокращения или отсутствия экипажа на борту.

Выделены следующие источники появления опасностей:

- окружающая среда;
- другие суда, находящиеся в непосредственной близости;
- действия рассматриваемого судна, связанные с выполнением поставленных задач.

Исследуя представленные ранее источники появления опасностей, выявлены потенциально опасные ситуации и сформулирован их неранжированный список, который был открытым и не ограничивал экспертов в его корректировке. Для систематизации представленного списка использован метод «мозговой штурм». В результате получен систематизированный список опасностей для обычного судна.

Таблица 4

Обобщенный перечень опасностей обычного судна

Опасность	Возможные опасные ситуации
1. Вред жизни и здоровью	Пожар на судне, эвакуация и оставление судна, операции с вертолетом, поиск и спасание, штормовая погода, повреждение судна в штормовую погоду, столкновение, обесточивание судна, неисправность главного двигателя, неисправность рулевого устройства, отказ радио и навигационного оборудования и систем, посадка на мель, затопление отсеков, потеря или порча груза, смещение груза, загрязнение окружающей среды, тяжелые болезни, травмы, смерть, человек за бортом, терроризм и пиратство, плавание при ограниченной видимости, плавание во льдах, информация о взрывном устройстве.
2. Загрязнение окружающей среды	
3. Утрата мореходных качеств	
4. Поступление воды	
5. Возгорание	
6. Столкновение	
7. Удар	
8. Террористический акт	

По сравнению с обычными судами управление рисками передается от экипажа к бортовым датчикам и программному обеспечению и, в конечном итоге, в центр управления. Анализ функций, охватывающих все аспекты действий судна, позволил выявить опасности и опасные события, связанные с этими функциями (табл. 5).

Таблица 5

Опасности и опасные события на основе обобщенного анализа функций судна

Функции	Опасности	Опасные события
1	2	3
Маршрут рейса	Утрата судна, столкновение, затопление, посадка на мель	Отказ соединения судно-центр управления Ошибка обновления данных (например, морских публикаций, прогнозов погоды) Человеческая ошибка при вводе плана рейса Человеческая ошибка в удаленном мониторинге и управлении (например, из-за неосведомленности о ситуации, неверного толкования данных, перегрузки емкости центра управления) Человеческая ошибка в дистанционном обслуживании
Навигация в ходе рейса	Утрата, столкновение, затопление, посадка на мель	Интенсивное движение, тяжелые погодные условия, плохая видимость, отказ силовой установки, сбой датчика, морская дикая природа (например, киты, кальмары, туши); плавающие объекты; морские установки
Обнаружение навигационных и экологических условий плавания	Столкновение, затопление, посадка на мель	Ошибка при обнаружении мелких предметов (например, обломков), ошибка при обнаружении объектов столкновения, ошибка в обнаружении навигационных плавучих знаков, ошибка при обнаружении огней судна и топовых фигур (вехи, бакены, буи) ошибка при обнаружении полупогружных буксируемых или плавающих устройств (например, сейсмические датчики, рыболовные тралы), обнаружение непредвиденных событий (например, странная волна), обнаружение значительного расхождения данных между нанесенной на карту глубиной воды и фактической глубины места, подводным объектом, обнаружение значительного расхождения данных между прогнозом погоды и фактической погодной ситуацией
Безопасность плавания и чрезвычайные ситуации	Столкновение, утрата судна, утрата другого судна, незаконные действия, захват	Ошибка в определении местоположения (например, из-за недоступности GPS); сбой связи в случае, если другое судно терпит бедствие (например, прием сообщения, ретрансляция, подтверждение); сбой связи в случае, если собственное судно терпит бедствие (например, с центром управления, соответствующими органами, судами, находящимися поблизости); пожар; затопление водой — внезапное повреждение корпуса; умышленное повреждение надстройки судна другими (например, пиратов, террористов); попытка несанкционированной посадки на судно (например, пираты, террористы, пассажиры, контрабандисты); отказ судовых ИТ-систем (например, из-за ошибок); глушение или подмена сигналов AIS или GPS; глушение или подделка сообщений, хакерская атака, а также нападение на центр управления (например, в случае пиратской или террористической атаки)

Таблица 5
(Окончание)

Безопасность судна, прочность корпуса судна	Столкновение, утрата судна, утрата другого судна	Ошибка в определении местоположения (например, из-за недоступности GPS); сбой связи в случае, если другое судно терпит бедствие (например, прием сообщения, ретрансляция, подтверждение) Сбой связи в случае, если собственное судно терпит бедствие (например, с центром управления, соответствующими органами, судами, находящимися поблизости); пожар; затопление водой — внезапное повреждение корпуса; потеря остойчивости и плавучести из-за структурного повреждения; потеря остойчивости из-за неблагоприятных реакций судна (например, на волны); потеря остойчивости из-за обледенения
Управление грузом	Утрата судна	Потеря остойчивости из-за сдвига и / или разжижения груза
Управление пассажирами		Превышение количества пассажиров на борту (перегрузка); пассажир за бортом; недомогание пассажиров; пассажир получил травму во время прибытия или отъезда; пассажир, вмешивающийся в бортовую систему (намеренно или нет)
Техническая инфраструктура	Потеря контроля, потеря наблюдения, посадка на мель	Ошибка датчика / привода; сбой датчика / привода из-за обледенения судна; временная потеря электричества (например, из-за отключения электроэнергии); постоянная потеря электричества; отказ ИТ-инфраструктуры судна (например, из-за пожара в серверной помещении); отказ двигательной установки, частичный или полный; отказ функции руля, частично или полностью; неспособность бросить якорь при дрейфе; отсутствие центра управления (пожар, явление окружающей среды) или оператора (обморок, аварийная ситуация и т. д.)

В соответствии с выявленными опасностями необходимо сформулировать виды рисков, содержание которых приведено далее.

Виды рисков

Риск столкновения. Возможностью столкновения безэкипажных средств водного транспорта с обычными судами является серьезной актуальной проблемой, не имеющей однозначного решения.

Безэкипажные средства водного транспорта нигде не упоминаются — ни в правилах предупреждения столкновений судов в море, ни в каких-либо других международных кодексах по этому вопросу. Обычные суда будут ходить в тех же водах, что и безэкипажные средства водного транспорта и важно, чтобы все суда следовали навигационным правилам. Можно предположить, что в недалеком будущем традиционное судоходство будет «уживаться» с автономными судами.

Риск пожара и взрыва. Ожидается, что риск, связанный с пожарами и взрывами, для безэкипажных средств водного транспорта ниже, чем для обычных судов. Повышенные риски могут возникать из-за отсутствия постоянного мониторинга и технического обслуживания систем машинного оборудования. Утечка масла или топлива может привести к пожарам, если их оставить без присмотра. Однако это может быть устранено путем автоматизированного мониторинга с помощью технологии видеонаблюдения.

Риск кибербезопасности. Использование информационных и коммуникационных технологий делает возможным виртуальные несанкционированные или злонамеренные действия на автономных судах (например, заражение вирусом). Передача данных между судном и берегом или сигнал GPS может быть преднамеренно нарушена или изменена с тем, чтобы захватить судно или нанести ему серьезный ущерб.

Одним из оптимальных видов практики использования информационных и коммуникационных технологий является принятие мер для обеспечения наивысшего уровня достоверности данных (например, защита, шифрование) и доступа пользователей (например, аутентификация по паролю).

Кибербезопасность представляет собой защиту систем операционных и информационных технологий, сетей и данных от несанкционированного доступа, манипуляций и сбоев.

Для организации кибербезопасности должны быть предусмотрены следующие функции:

- роль персонала, его обязанности по управлению кибер-рисками, системы, активы, данные, которые в случае нарушения создают риски для операций на судне;
- защита процессов и мер контроля рисков, планирование действий в чрезвычайных ситуациях для защиты от кибер-событий;
- обнаружение — разработка и реализация мероприятий, необходимых для своевременного обнаружения кибер-события;
- реагирование — разработка и реализация мероприятий и планов по обеспечению устойчивости и восстановлению систем, поврежденных из-за кибер-события;
- восстановление — определение мер резервного копирования и восстановления кибер-систем, пострадавших от кибер-события.

Оценка рисков

Риск для каждого «сценария» появления опасности оценивается с помощью индекса риска в виде комбинации частоты причины и серьезности последствия.

Частота оценивается по вероятности того, что событие произойдет один раз в год на флоте из нескольких судов, имеющих одинаковый режим работы, используются частотные показатели, основанные на логарифмической шкале (табл. 6).

Таблица 6

Индекс частоты

Индекс	Определение	Определение	За год
7	Частые	Скорее всего, происходит один раз в месяц на одном судне	10
6	Общие	Скорее всего, происходит один раз в год на одном судне	1
5	Умеренно	Скорее всего, происходит один раз в год на флоте из десяти судов, т. е. может произойти несколько раз в течение жизни судна	0,1
4	Возможные	Скорее всего, происходит один раз в год на флоте из 100 судов	10^{-2}
3	Удаленно	Скорее всего, происходит один раз в год в флоте из 1000 судов, т. е. может произойти в общей жизни нескольких аналогичных судов	10^{-3}
2	Маловероятно	Скорее всего, произойдет один раз в жизни (20 лет) флота из 500 судов	10^{-4}
1	Крайне маловероятно	Скорее всего, произойдет один раз в жизни (20 лет) мирового флота из 5000 судов	10^{-5}

Серьезность оценивается в зависимости от воздействия на человека, судно или окружающую среду. Индексы серьезности, основанные на логарифмической шкале, приведены в табл. 7.

Таблица 7

Индекс тяжести

Индекс	Определение	Ущерб для человека	Ущерб для судна	Эквивалентность для человека/судна	Окружающая среда	Эквивалентность разлива нефти или химических веществ
1	Незначительный	Незначительные травмы	Повреждение местного оборудования	0,01	Местный разлив	< 1

Таблица 7
(Окончание)

2	Существенный	Множественные или тяжелые травмы	Несерьезное повреждение судна	0,1	Значительный локальный разлив	1–100
3	Серьезный	Одиночный смертельный исход или множественные тяжелые травмы	Сильный урон	1	Сильный крупный разлив	100–10 000
4	Катастрофический	Несколько смертельных исходов	Полная потеря	10	Очень большой разлив	> 10 000

Индекс риска равен сумме индекса частоты и индекса серьезности. По результатам расчета формируется матрица риска. Пример результатов анализа риска приведен в табл. 8. «Порог допустимости риска» можно оценить, например, с учетом экономических параметров.

Таблица 8

Результаты анализа рисков

Событие	Опасность	Частотный индекс	Индекс серьезности			Индекс риска		
			человек	судно	Окружающая среда	человек	судно	Окружающая среда
Отказ судовых ИТ-систем (например, из-за ошибок)	Потеря	3	1	4	1	4	7	4
Ошибка в определении местоположения (например, из-за доступности GPS)	Столкновение	4	2	2	1	6	6	5
Плохая видимость	Столкновение	7	2	2	1	9	9	8
Пожар	Потеря	4	1	4	2	5	8	6

Варианта контроля риска для автономных судов приведены в качестве примера в табл. 9.

Таблица 9

Варианты контроля рисков

Категории	Варианты контроля рисков
Беспилотное транспортное средство и центр управления судном	Проектирование центра управления для правильного контроля и мониторинга, укомплектование персоналом, а также обучение персонала.
	На беспилотном судне необходимо отсутствие человека
	Судно должно контролироваться напрямую в условиях интенсивного или сложного движения
	Судно без жилых помещений намного легче обезопасить

Таблица 9
(Окончание)

Техническое обслуживание и операции без человека	Проектирование бортовых систем для легкого обслуживания и точного контроля состояния
	Нужна избыточная мощность генерации, распределения, движения и рулевого управления
	Автоматизированные системы пожаротушения требуются во всех соответствующих областях. CO ₂ можно использовать более безопасно
	Требуется улучшение контроля и планирования размещения грузов
Сложная погода	Программное обеспечение должно позволить избежать мест с опасной погодой, а также использование маршрутизации движения с учетом погоды
Сенсорные системы	Нужны хорошие датчики и системы, позволяющие избежать столкновения. Выбранные системы также должны быть избыточными, чтобы один сбой не отключал критические функции, выявленные во время оценки риска
Кибер-безопасность	Важны меры кибербезопасности, включая альтернативную оценку местоположения на основе не-GPS систем. Центр управления может быть особенно уязвимым. Каналы передачи данных также должны иметь достаточную избыточность.

Обсуждение (Discussion)

Безэкипажные средства водного транспорта относятся к автономным судам с высокой степенью автономности систем судна, когда судовые системы не ожидают подтверждения человеком принятых решений. Человек информируется только в случае крайней необходимости. Возможно и такое более сокращенное определение: *безэкипажное (беспилотное) судно является вариантом автономного судна с высокой степенью автономности.*

Опасности для автономных судов соответствуют опасностям обычных судов, но также новые опасности могут возникать ввиду сокращения или отсутствия экипажа на борту.

Оценка риска и технологии — две качественные оценки, которые целесообразно использовать при анализе новых решений, к которым можно отнести безэкипажные средства водного транспорта. Цель этих оценок состоит в том, чтобы идентифицировать и снизить, насколько это практически возможно, риски, связанные с опасностями, возникающие при использовании безэкипажных средств водного транспорта (автономных судов).

Оценка риска для технологий зависит от степени достоверности используемой технологии и уровня автономности технологии. Степень достоверности технологии определяет вероятность сбоя (частоту) и / или последствия этого сбоя (влияние на серьезность). Чтобы увеличить или уменьшить возможный риск новой технологии, степень достоверности технологии необходимо оценить по уровню совершенства технологии и по предлагаемым условиям эксплуатации. Уровень автономности технологии определятся по роли человека в реализации функций системы.

Выводы (Summary)

1. Спектр методов анализа рисков включает тридцать один метод. Выбор методов анализа зависит от достаточно большого количества факторов. На современном этапе развития безэкипажных судовых систем возможно получение качественной оценки риска.

2. Заслуживают внимания следующие методы: HAZOP, FMEA, анализ «галстук-бабочка». Для представления результатов анализа матрицы риска использовался принцип ALARP.

3. Применение инструментов HAZOP, FMEA и «галстук-бабочка» в интересах создания решающих правил для СППР позволяют:

- повысить эффективность процесса разработки;
- получить наиболее точное и достоверное описание процесса принятия решений по обеспечению безопасности;
- получить синергетический эффект за счет совместного применения результатов исследования рисков различными методами и использования достоинств каждого из применяемых инструментов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Dan Hook, ASV. MASS - The Reality Today. UK Maritime Alliance [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <http://www.ukmarinealliance.co.uk> (дата обращения: 15.11.2019).
2. Paton G. UK's first fully autonomous vessel the C-Worker 7 is launched / G. Paton // The Times. — 2018. — March.
3. Wróbel K. System-theoretic approach to safety of remotely-controlled merchant vessel / K. Wróbel, J. Montewka, P. Kujala // Ocean Engineering. — 2018. — Vol. 152. — Pp. 334–345. DOI: 10.1016/j.oceaneng.2018.01.020.
4. Каретников В. В. Некоторые аспекты создания телекоммуникационной автоматизированной системы организации движения судов на внутренних водных путях / В. В. Каретников, А. И. Меншиков, С. В. Рудых // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2019. — Т. 11. — № 2. — С. 222–229. DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-2-222-229.
5. Wrobel K. Towards the assessment of potential impact of unmanned vessels on maritime transportation safety / K. Wrobel, J. Montewka, P. Kujala // Reliability Engineering & System Safety. — 2017. — Vol. 165. — Pp. 155–169. DOI: 10.1016/j.res.2017.03.029.
6. Скороходов Д. А. Применение инструментов анализов рисков при создании решающих правил систем поддержки принятия решения / Д. А. Скороходов [и др.] // Морские интеллектуальные технологии. — 2019. — № 3-3 (45). — С. 114–120.
7. DIMECC. One Sea Ecosystem. — 2016 [Электронный ресурс]. — Режим доступа: www.oneseaecosystem.net (дата обращения: 15.11.2019).
8. ITF/IFSMA. MSC 99/5/1. Paper. — London: IMO, 2018.
9. Crew Connectivity. Survey Report. — London: Futurenautics Ltd., 2018. — 52 p.
10. Jorgensen J. Autonomous Vessels: ABS' Classification Perspective. Discussion Issues in Technology, Safety and Security for the Marine Board / J. Jorgensen. — American Bureau of Shipping, 2016. — 15 p.
11. Guidelines for Formal Safety Assessment (FSA) for Use in the IMO Rule-making Process. MSC/Circ.1023, T5/1.01, MEPC/Circ.3925. — London: International Maritime Organization, 2002. — 54 p.
12. Amendments to the guidelines for formal safety assessment (FSA) for Use in the IMO rule-making process (MSC/CIRC.1023 - MEPC/CIRC.392). — London: International Maritime Organization, 2006. — 15 p.
13. Скороходов Д.А. Применение инструментов анализа рисков при создании решающих правил систем поддержки принятия решения / Д.А. Скороходов, И. В. Степанов, С. Н. Турусов, Н. В. Никитин // Морские интеллектуальные технологии. — 2019. — № 3-3 (45). — С. 114–120.
14. Турусов С. Н. Системы управления готовностью технических средств морских подвижных объектов / С. Н. Турусов, И. В. Степанов, Д. А. Скороходов; под общей ред. д-ра техн. наук., проф. С. Н. Турусова. — СПб.: Издательско-полиграфическая ассоциация высших учебных заведений, 2019. — 290 с.
15. Степанов И.В. Методы принятия решений в системах информационной поддержки управления эксплуатацией технических средств корабля / И. В. Степанов, С. Н. Турусов, С. О. Шапошников // Труды II Международной конференции и выставки по морским информационным технологиям (МОРИНТЕХ–97), г. Санкт-Петербург, 10–13 сент. 1997 г. — СПб., 1997. — Т. 3. — С. 53–57.
16. Латынцева С.В. Применение методов анализа рисков для создания систем поддержки принятия решений по обеспечению безопасности / С. В. Латынцева, И. В. Степанов, С. Н. Турусов // Актуальные проблемы защиты и безопасности: тр. XXII Всероссийской науч.-практ. конф. РАРАН. — СПб.: Российская академия ракетных и артиллерийских наук, 2019. — С. 399–408.
17. Латынцева С. В. Принятие решений по предупреждению и ликвидации аварий в условиях неопределенности / С.В. Латынцева, И.В. Степанов, С.Н. Турусов // Актуальные проблемы защиты и безопас-

ности: Труды XVIII Всероссийской научно-практической конференции РАРАН. — М.: ФГБУ «РАРАН», 2015. — Т. 2. — С. 441–451.

REFERENCES

1. Dan Hook, ASV. MASS - The Reality Today. UK Maritime Alliance. Web. 15 Nov. 2019 <<http://www.ukmarinealliance.co.uk>>.
2. Paton, Graeme. "UK's first fully autonomous vessel the C-Worker 7 is launched." *The Times* March (2018).
3. Wróbel, Krzysztof, Jakub Montewka, and Pentti Kujala. "System-theoretic approach to safety of remotely-controlled merchant vessel." *Ocean Engineering* 152 (2018): 334–345. DOI: 10.1016/j.oceaneng.2018.01.020
4. Karetnikov, Vladimir V., Aleksandr I. Menshikov, and Sergey V. Rudy'kh. "Some aspects of creating a telecommunication automated system for organizing the vessels traffic on inland waterways." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 11.2 (2019): 222–229. DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-2-222-229.
5. Wróbel, Krzysztof, Jakub Montewka, and Pentti Kujala. "Towards the assessment of potential impact of unmanned vessels on maritime transportation safety." *Reliability Engineering & System Safety* 165 (2017): 155–169. DOI: 10.1016/j.ress.2017.03.029
6. Skorokhodov, Dmitriy A., Ilya V. Stepanov, Sergey N. Turusov, and Nikolay V. Nikitin. "Application of risk analysis for establishing decision rules in decision support systems." *Marine intelligent technologies* 3-3(45) (2019): 114–120.
7. DIMECC. One Sea Ecosystem. Web. 15 Nov. 2019 <www.oneseaecosystem.net>.
8. *ITF/IFSM. MSC 99/5/1. Paper*. London: IMO, 2018.
9. *Crew Connectivity. Survey Report*. London: Futureautics Ltd., 2018.
10. Jorgensen, John. *Autonomous Vessels: ABS' Classification Perspective. Discussion Issues in Technology, Safety and Security for the Marine Board*. American Bureau of Shipping, 2016.
11. *Guidelines for Formal Safety Assessment (FSA) for Use in the IMO Rule-making Process*. MSC/Circ.1023, T5/1.01, MEPC/Circ.3925. London: International Maritime Organization, 2002.
12. *Amendments to the guidelines for formal safety assessment (FSA) for Use in the IMO rule-making process (MSC/CIRC.1023 - MEPC/CIRC.392)*. London: International Maritime Organization, 2006.
13. Skorokhodov, Dmitriy A., Ilya V. Stepanov, Sergey N. Turusov, and Nikolay V. Nikitin. "Application of risk analysis for establishing decision rules in decision support systems." *Marine intelligent technologies* 3-3(45) (2019): 114–120.
14. Turusov, S. N., I. V. Stepanov, and D. A. Skorokhodov. *Sistemy upravleniya gotovnost'yu tekhnicheskikh sredstv morskikh podvizhnykh ob'ektov*. Edited by S.N. Turusov. SPb.: Izdatel'sko-poligraficheskaya assotsiatsiya vysshikh uchebnykh zavedenii, 2019.
15. Stepanov, I. V., S.N. Turusov, and S. O. Shaposhnikov. "Metody prinyatiya reshenii v sistemakh informatsionnoi podderzhki upravleniya ekspluatatsiei tekhnicheskikh sredstv korablya." *Tr. II Mezhdunar. konf. i vystavki po morskim informatsionnym tekhnologiyam (MORINTEKh-97)*. Vol. 3. SPb., 1997. 53–57.
16. Latyntseva, S.V., I.V. Stepanov, and S.N. Turusov. "Primenenie metodov analiza riskov dlya sozdaniya sistem podderzhki prinyatiya reshenii po obespecheniyu bezopasnosti." *Aktual'nye problemy zashchity i bezopasnosti: Trudy XXII Vserossiiskoi nauchno-prakticheskoi konferentsii RARAN*. SPb.: Rossiiskaya akademiya raketnykh i artilleriiskikh nauk, 2019. 399–408.
17. Latyntseva, S. V., I. V. Stepanov, and S. N. Turusov. "Prinyatie reshenii po preduprezhdeniyu i likvidatsii avarii v usloviyakh neopredelennosti." *Aktual'nye problemy zashchity i bezopasnosti: Trudy XVIII Vseros. nauchno-prakticheskoi konf. RARAN*. Vol. 2. M.: FGBU «RARAN», 2015. 441–451.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

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

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

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

Козик Сергей Викторович — кандидат военных наук, профессор
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала
С. О. Макарова»
198035, Российская Федерация, г. Санкт-Петербург,
ул. Двинская, 5/7

e-mail: *koserbik@mail.ru, kaf_svvp@gumrf.ru*

Буцанец Артем Александрович — аспирант -
контактное лицо

Научный руководитель: Каретников Владимир
Владимирович

ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала

С.О. Макарова»

198035, Российская Федерация, Санкт-Петербург,

ул. Двинская, 5/7

e-mail: *butsanetsaa@gumrf.ru*

Kozik, Sergey V. — PhD, professor
Admiral Makarov State University of Maritime and
Inland Shipping

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

e-mail: *koserbik@mail.ru, kaf_svvp@gumrf.ru*

Butsanets, Artem A. — Postgraduate

Supervisor: Karetnikov, Vladimir V.

Admiral Makarov State University of Maritime and
Inland Shipping

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

e-mail: *butsanetsaa@gumrf.ru*

Статья поступила в редакцию 18 ноября 2019 г.

Received: November 18, 2019.

DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-6-1003-1010

ASSESSMENT OF THE FUNCTIONAL STATES OF BIOLOGICAL OBJECTS BY THE GAS-DISCHARGE VISUALIZATION METHOD

U. N. Lisenko¹, A. I. Sokolov¹, I. A. Sokolova²

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

² — City hospital of St. George, St. Petersburg, Russian Federation

At present, at the current level of the water transport development, there is a fairly stable tendency to complicate the professional activities of seamen. The development of scientific and technological progress can be considered one of the main reasons for this trend occurrence. As a result, fundamentally new models of equipment have appeared in the arsenal of a modern skipper, and consequently the professional activity of the water transport specialists becomes more and more indirect. It should be noted that on the basis of existing research results on ensuring the transport safety at sea, scientists note that the human factor is one of the main causes of accident in the water transport. A complex term, that describes the possibility for a skipper to make erroneous or similar decisions while ensuring the navigation safety in specific situations under various conditions of its operation, is the human factor. At the same time, modern science knows that the skipper ability, if he is in a suboptimal (unacceptable) state due to the influence of environmental factors and the peculiarities of his adaptive limits, the psychophysiological characteristics of a particular person, can significantly decrease, that will prevent him to understand the necessary degree of adequacy in the current situation and make the right decision. The seafarers fatigue does not have a legally established and precise definition, on the basis of this the International Maritime Organization (IMO) uses the following term “reduction of physical and (or) mental capabilities as a result of physical, mental or emotional stress, which can weaken almost all physical capabilities”. Based on ensuring the navigation safety of ships for managing the human factor, it is extremely important to create the possibility of developing a proactive, controlling effect on the skipper, leveling negative situations caused by the influence of the human factor. Adverse functional conditions may arise for the skipper during performing his professional duties, which will undoubtedly affect the quality of his decisions. Ensuring the navigation safety on the basis of an assessment of the skipper functional state is taking into account a set of characteristics, functions and qualities of a particular individual, which directly or indirectly determine his duties fulfillment to ensure the navigation safety, the current manifestation of his psychophysiological and mental capabilities in a specific period of time. A method for ensuring navigation safety based on instrumental measurements of the functional state of a modern skipper during performing his duties, which allows us to quantitatively assess the degree of external factors influence on the correctness of his decisions and ensure the navigation safety, is described in the paper.

Keywords: gas discharge visualization method, functional states, GDV grams, shipping safety.

For citation:

Lisenko, Uriy N., Andrei I. Sokolov, and Irina A. Sokolova. “Assessment of the functional states of biological objects by the gas-discharge visualization method.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 11.6 (2019): 1003–1010. DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-6-1003-1010.

УДК 57.02/614/656.6

МЕТОД ОБЕСПЕЧЕНИЯ БЕЗОПАСНОСТИ ПЛАВАНИЯ СУДОВ НА ОСНОВЕ ОЦЕНКИ ФУНКЦИОНАЛЬНОГО СОСТОЯНИЯ СУДОВОДИТЕЛЯ

Ю. Н. Лысенко¹, А. И. Соколов¹, И. А. Соколова²

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

² — СПб ГБУЗ «Городская больница Святого Великомученика Георгия»,
Санкт-Петербург, Российская Федерация

Отмечается, что в современных условиях профессиональная деятельность судоводителей имеет склонность к усложнению. Научно-технический прогресс является основным фактором этого процесса.

Технические средства, которыми пользуется современный судоводитель, принципиально изменились, профессиональная деятельность специалистов водного транспорта становится более опосредованной. Статистические данные позволяют утверждать, что человеческий фактор является основной причиной аварийности на водном транспорте. Человеческий фактор, исследуемый в призме проблемы безопасности судовождения, характеризуется как комплекс ошибочных действий, совершаемых судоводителем, которые могут оказать и оказывают влияние на безопасность судоходства. В современном научном мире доказано и проверено экспериментально, что ресурсы судоводителя, когда он пребывает в плохом психофизическом состоянии, вызванном воздействиями обстоятельств внешней среды и в большей степени ситуацией его привыкания к окружающей обстановке и воздействующих на него факторов, а также психофизиологические свойства судоводителя могут значительно ухудшаться и это обстоятельство с большой вероятностью может помешать ему разобраться в текущей обстановке по существу и принять единственно правильное решение. Для обеспечения безопасного судовождения необходимо взять под контроль человеческий фактор, нужна разработка механизма воздействия на судоводителя и контроля его состояния. Предлагается выработать такие механизмы путем оценки функциональных состояний судоводительского состава. При выполнении судоводителем служебных обязанностей у него возникают функциональные состояния неблагоприятного характера, которые действуют отрицательно на скорость и качество принимаемых им решений. Для обеспечения плавания судов на безопасном уровне требуется комплексная оценка функциональных состояний судоводителей. В статье приведено описание метода, который позволит увеличить безопасность транспортного процесса. Основой данного метода служат инструментальные измерения функциональных состояний судоводительского состава в течение периода несения ходовой навигационной вахты.

Ключевые слова: метод газоразрядной визуализации, функциональные состояния, ГРВ грамм, безопасность судоходства.

Для цитирования:

Лысенко Ю. Н. Метод обеспечения безопасности плавания судов на основе оценки функционального состояния судоводителя / Ю. Н. Лысенко, А. И. Соколов, И. А. Соколова // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2019. — Т. 11. — № 6. — С. 1003–1010. DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-6-1003-1010.

Введение (Introduction)

В современном научном мире проводятся междисциплинарные комплексные научные исследования, для реализации которых строятся различного рода модели, которые подразделяют на *предсказывающие, описательные и объяснительные*. Для решения задач прикладного характера в науке психодиагностике принято пользоваться статистическими (предсказывающими) моделями. Такие модели в большей степени способствуют выработке различных гипотез, на базе которых можно получить объяснение выявленных закономерностей [1]. В основном создание предсказывающих моделей происходит на базе уравнений регрессии, основой которых являются методы многомерного статистического анализа. Для того чтобы рассчитать статистические характеристики распределения оценок, требуется знание следующих величин: средней арифметической оценки и дисперсии [2]. Используя статистические характеристики, основанные на критериях согласия, можно определить и принять предположение о том, что измеренная величина подчинена нормальному закону распределения. Все оценки необходимо нормализовать, так как большинство методов статистического анализа основано на факте нормального распределения случайной величины. При отсутствии шанса воспользоваться гипотезой о нормальном законе следует выполнить преобразования, после чего появляется возможность использовать *метод непараметрической статистики*.

Для того чтобы определить наличие связи между двумя переменными, следует выполнить корреляционный анализ между двумя или несколькими переменными, а также необходимо эту статистическую связь выразить в количественной мере. Для расчета коэффициента корреляции существует большое количество различных формул. Выбор формулы целесообразно производить в зависимости от вида шкалы, на основе которой были выполнены измерения. Как правило, принято использовать парный коэффициент корреляции [3].

Исследование по разработке моделей происходит в нескольких направлениях, для исходного формирования модели принято использовать матрицу корреляции. Направление разработки моделей ориентировано на отклик, исходя из наличия которого происходит разработка в том или ином на-

правлении. В данном случае откликом считается более достоверный результат исследования, для которого необходимо большее количество времени для оценивания потенциала психофизиологических функций. Роль отклика также может выполнять вывод из психолого-педагогического исследования, большой по времени исследования человека результат, экспертные оценки, выводы психологической диагностики человека и группы людей. При отсутствии отклика разработку ведут с помощью *метода факторного анализа*. Суть данной методики заключается в выявлении напрямую не рассматриваемых факторов, а тех, которые наиболее точно описывают связь нескольких психологических методов, отображаемых в матрице корреляции. На рис. 1 представлена логическая схема для применения метода бутстреп, используемого для формирования регрессионных моделей оценки когнитивных функций.

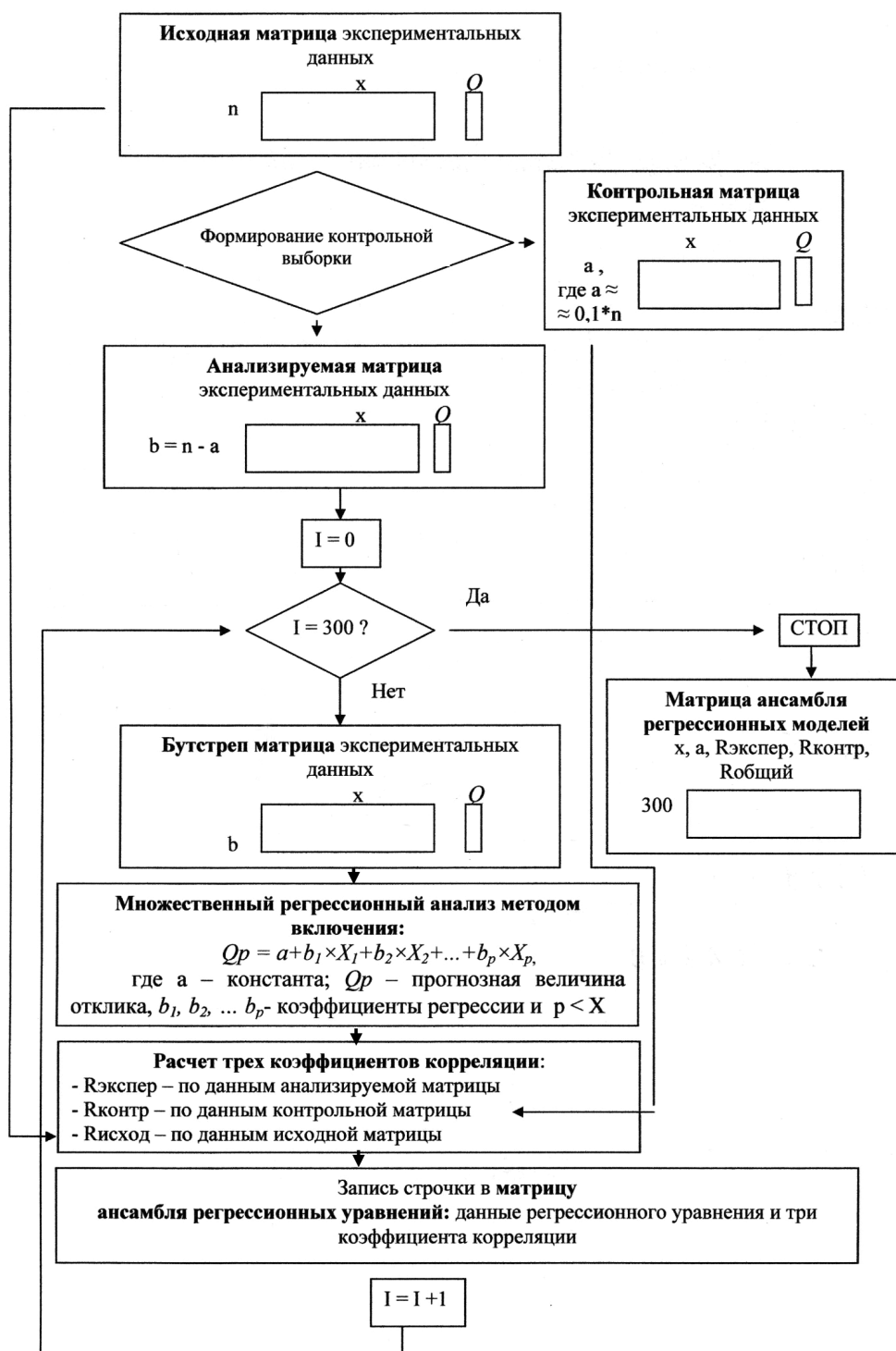


Рис. 1. Логическая схема бутстреп-анализа

В начале каждого исследования определяются цели и в зависимости от них используют различные алгоритмы, такие как алгоритмы факторного и компонентного анализа. Выполняют исследование матрицы факторных нагрузок, находят состав факторов, определяют их обозначение. Для данного рода исследований очень важным является использование регрессионных уравнений, так как они помогают понять уровень определенных общих факторов [4]. На рис. 2 приведена прогностическая схема для использования метода статистического анализа, применяемого для построения моделей оценки когнитивных функций.

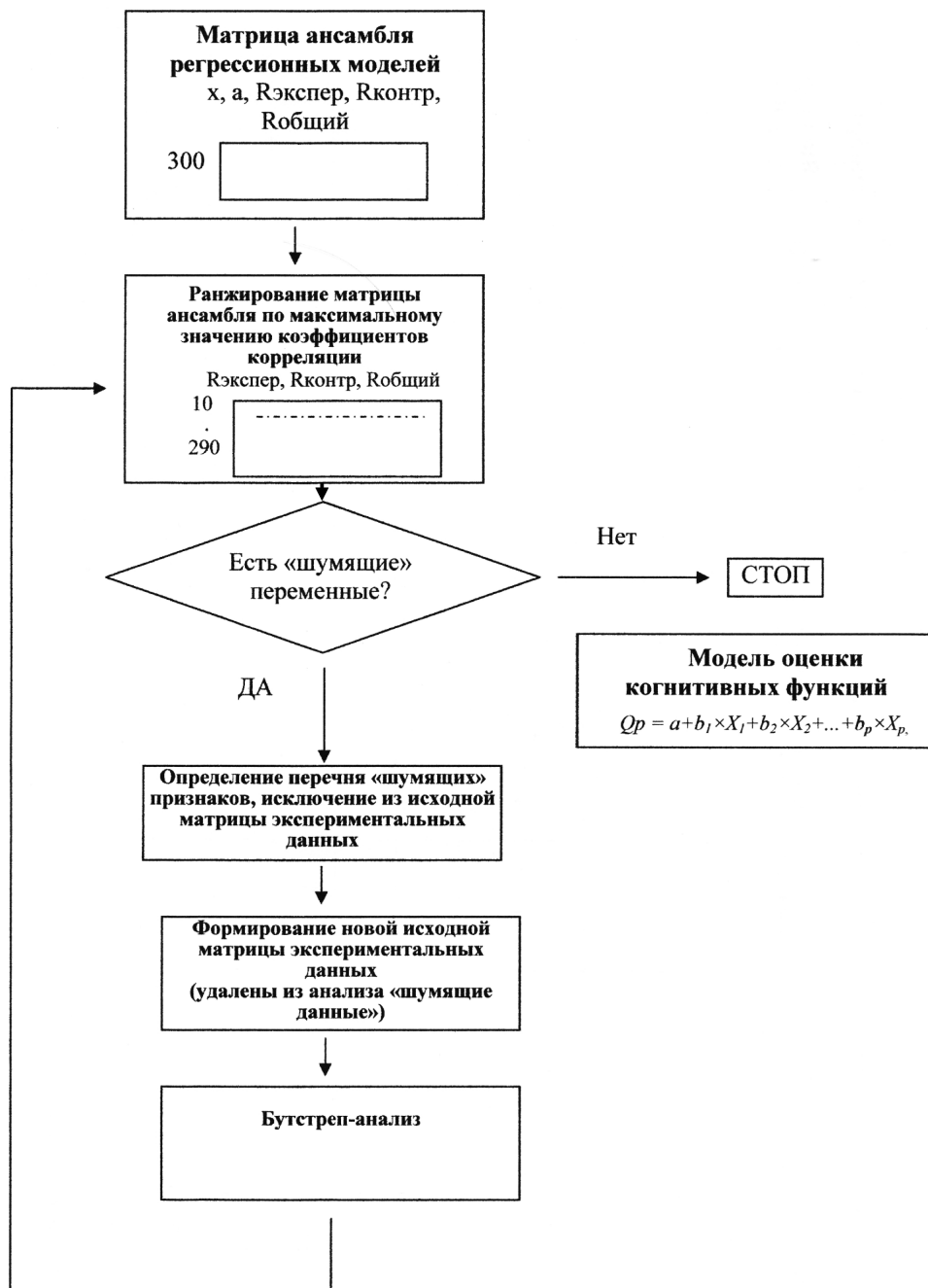


Рис. 2. Прогностическая схема использования методов статистических анализа

Следующим этапом служит математическая обработка данных, полученных в результате проведенного эксперимента, исследование всех выделенных моделей и выявление несоответствий. За эталон берется качество теоретической модели, с которой производится полное сравнение психодиагностических функций исследуемой модели, благодаря чему можно оценить качество и реа-

листичность всего кластера методик психодиагностики. Если в результате сравнительных тестов наблюдаются слишком выраженные различия, то алгоритмы выбора методов и исследований психологических факторов многократно повторяют до устранения больших различий. В ходе таких экспериментов формируется ясная картина различия систем оценки.

Явление обычного способа для выполнения методик анализа статистических данных при применении для прогнозирования психодиагностических данных показывает, что математические модели, полученные в результате исследования, крайне нестабильны и их использование для контроля выборок в настоящих практических условиях затруднительно. С целью поиска наиболее устойчивых моделей обычную процедуру принятия нагружают дополнительной схемой, которая находится в поле методик размножения выборок и в математической науке называется *бутстреп* [5]. Метод бутстреп наиболее применим в современных ячейках с непростыми условиями и явлениями, когда база данных эксперимента недостаточна по отношению к составу переменных данных, используемых в исследовании. Данный метод получен на основе метода Монте-Карло. В нем информирование происходит не на основе новых данных, а уже имеющихся [6].

Методы и материалы (Methods and Materials)

В результате проведения длительного эксперимента были выработаны два психодиагностического метода, которые наиболее полно могут оценить функциональные состояния судоводительского состава с целью обеспечения безопасности на флоте, а именно: «кольца Ландольта» и «краткий ориентировочный тест» [7], [8]. Второе функциональное состояние представляет собой тест, состоящий из заданий, в количестве, равном пятидесяти трем, и их решений, которые можно решить только при развитии таких умственных способностей, как память, умение работать с информацией на вербальном уровне, в том числе владение операциями из области аналитики. После проведения тестирования анализируются данные, такие как общее количество задач, которые не решены, и решенных задач, и далее выводится общее значение, получившее название *эффективность*, которые включает все нерешенные и все решенные задачи и осуществляет прогнозирование по исследованию газоразрядной визуализации (ГРВ) — ГРВ-граммы.

С целью общего исследования таких качеств, как интеллект в выборки, были использованы выводы, сделанные по другим тестам «Корректирующая проба», представленным в виде теста «Кольца Ландольта». Представленный тест показывает взаимосвязь интеллектуальных качеств, таких как память и внимание. В нем основными критериями оценки интеллектуальных качеств служат: количество просмотренных колец и количество совершенных ошибок.

В ходе эксперимента были взяты пять критериев, наиболее полно описывающие функциональные состояния судоводителя, оцениваемые по ГРВ-граммам [9]. С целью получения выводов тестов психодиагностического характера были использованы сведения восьми ГРВ-грамм, такие как данные, полученные на основе проведенных исследований газоразрядного свечения состояния исследуемого объекта, типичные для различного уровня его здоровья. На основании того, что снятия показаний происходит на нескольких уровнях с использованием и без использования фильтра, для первого ГРВ параметра были взяты двадцать пять числовых значений [10]. Для формирования прогностических моделей были использованы результаты статистических исследований данных ГРВ характеристик с целью вывода условия их развития и возможного использования методов анализа параметрическим способом [11]. В ходе эксперимента были получены достоверные данные и выполнено сравнение с данными, полученными в ходе испытаний по общим законам распределения по показателям асимметрии и эксцесса, что позволяет использовать параметрические методы анализа данных с целью вывода прогностических математических моделей. Полученные модели полностью совпадают с уже используемой методикой статистического анализа, которая включает такие методы, как *шаговый регрессионный анализ* способом включения, и *бутстреп-метод* (рис. 2 и 3).

Разработка осуществлялась с применением комплекса статистических утилитарных программ STATISTICA 6 с использованием интерфейса на русском языке [12], [13]. С целью усовершенствования

выполняемых вычислений в форме комплекса STATISTICA 6 и автоматического течения выбора показателей, коэффициент регрессии которых может быть статистически истинным ($p < 0,01$), был выработан макрос на языке STATISTICA Visual Basic. В ходе проведенных экспериментов было выявлено, что количество итераций, из-за которых происходит сходимость процесса и выработка наиболее применимой группы ГРВ данных, лежит в пределах 10–12. Была создана математическая модель определения когнитивных показателей, которая способна по данным ГРВ-граммы определить функциональное состояние судоводительского состава с целью обеспечения безопасности транспортного процесса.

Результаты (Results)

На основе выработанных показателей определения функциональных условий судоводительского состава существует большая вероятность гарантии безопасности транспортного процесса. На рис. 3 показано выполнение на практике метода обеспечения безопасности судоходства, в основе которого лежит определение функциональных состояний судоводительского состава, сформированного на базе применения чек-листов, сформированных в структуре системы управления безопасностью.

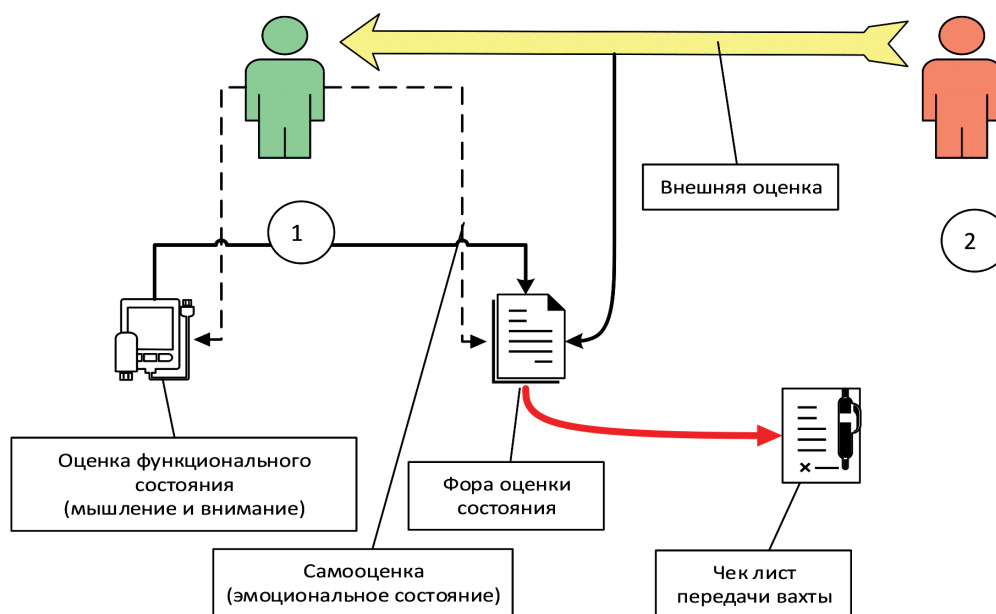


Рис. 3. Использование метода обеспечения безопасности судоходства на базе определения функциональных состояний судоводительского состава

Заключение (Conclusion)

Прикладной алгоритм действия метода обеспечения безопасности судоходства на базе определения функциональных состояний судоводителя действует следующим образом: если на основе произведенных измерений у заступающего на ходовую навигационную вахту судоводителя выявлено критическое функциональное состояние, то смена вахты им исключена. Все процедуры оценивания функциональных состояний накапливаются и впоследствии досконально рассматриваются ответственным за анализ лицом для формирования административных и координационных резолюций, целью которых является минимизирование и полное исключение отрицательной формы профессионального выгорания у членов экипажа.

Выработка заключения о состоянии судоводительского состава принимается на основе базового заключения о функционировании когнитивных показателей и, в конечном счете, на основе оценивания непосредственно самим судоводителем именно своего состояния и действительных показателей осуществления должностных функций.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Соколова И. А. Обоснование метода обеспечения безопасности плавания судов на основе функционального состояния судоводителя: дис. канд. техн. наук; специальность: 05.22.19 «Эксплуатация водного транспорта, судовождение» / И. А. Соколова. — СПб.: ФГБОУ ВО «ГУМРФ им. адм. С. О. Макарова», 2018. — 152 с.
2. Омаров М. А. Поиск способов построения информационных систем оценивания сложности ситуации в медицине и на транспорте на примере конкретных ситуаций / М. А. Омаров, И. И. Цехмистро, А. А. Трубицин // Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті. — 2015. — № 5 (114). — С. 66–75.
3. Кубасов Р. В. Проблемы стресса и адаптации в морской медицине / Р. В. Кубасов [и др.] // Морская медицина. — 2015. — Т. 1. — № 3. — С. 13–18.
4. Морская доктрина Российской Федерации // Морская медицина. — 2015. — Т. 1. — № 3. — С. 66–87.
5. Привалов В. Е. 23-я Международная конференция «Лазерно-информационные технологии в медицине, биологии, геоэкологии на транспорте-2015» / В. Е. Привалов, В. А. Туркин, В. Г. Шеманин // Вестник государственного морского университета им. адмирала Ф. Ф. Ушакова. — 2016. — № 2 (15). — С. 76–81.
6. Попова Т. В. Метод газоразрядной визуализации в исследовании влияния физических нагрузок на организм / Т. В. Попова, О. Г. Коурова, Е. Г. Кокорева // Центрально-европейский журнал науки и исследований. — 2015. — Т. 60. — С. 24.
7. Глухова Н. В. Метод расчета неопределенности измерений геометрических параметров газоразрядных изображений / Н. В. Глухова // Системи обробки інформації. — 2016. — № 6. — С. 32–35.
8. Каретников В. В. Исследование влияния усталости судоводителя на процесс обеспечения безопасности судоходства / В. В. Каретников, С. В. Козик, И. А. Соколова // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2017. — Т. 9. — № 2. — С. 272–279. DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-2-272-279.
9. Özsever B. Analysing the effects of working period on psychophysiological states of seafarers / B. Özsever, L. Tavacıoğlu // International Maritime Health. — 2018. — Vol. 69. — Is. 2. — Pp. 84–93. DOI: 10.5603/IMH.2018.0013.
10. Yuli Y. Human factors in vessel safety operation: a study of Indonesian seafarers / Y. Yuli, W. Handoko, A.A. Wijinurhayati // Ponte Academic Journal. — 2017. — Vol. 73. — Is. 10. DOI: 10.21506/j.ponte.2017.10.21.
11. Jeon J. W. Ship Safety Policy Recommendations for Korea: Application of System Dynamics / J.W. Jeon, Y. Wang, G. T. Yeo // The Asian Journal of Shipping and Logistics. — 2016. — Vol. 32. — Is. 2. — Pp. 73–79. DOI: 10.1016/j.ajsl.2016.06.003.
12. Akyuz E. Utilisation of cognitive map in modelling human error in marine accident analysis and prevention / E. Akyuz, M. Celik // Safety Science. — 2014. — Vol. 70. — Pp. 19–28. DOI: 10.1016/j.ssci.2014.05.004.
13. Димитракиев Д. Procedures for improving safety in the shipping activities / Д. Димитракиев, В. Станков, К. Атанасова // Научни трудове–Висше военноморско училище «Н.Й. Вапцаров». — 2017. — Vol. 32. — Pp. 5–11. DOI: 10.14748/scnvna.v32i0.4488.

REFERENCES

1. Sokolova, I. A. Obosnovanie metoda obespechenia bezopasnosti plavania sudov na osnove funkcionalnogo sostoiyania sudovoditeliya. Phd diss. SPb.: FGBOU SUMRF im. adm. S.O. Makarova, 2018.
2. Omarov, M. A., I. I. Tsekhmistro, and A. A. Trubitsin. "Poisk sposobov postroeniya informatsionnykh sistem otsenivaniya slozhnosti situatsii v meditsine i na transporte na primere konkretnykh situatsii." *Informatsiino-keruyuchi sistemi na zaliznichnomu transporti* 5(114) (2015): 66–75.
3. Koubassov, R. V., V. V. Lupachev, I. M. Boyko, M.V. Popov, and E. D. Koubassova. "Climate-geographic environments of main sea shipping regions that based in Archangelsk and health condition of sailor staffs." *Marine medicine* 1.3 (2015): 13–18.
4. "Morskaya doktrina Rossiiskoi Federatsii." *Marine medicine* 1.3 (2015): 66–87.
5. Privalov, V. E., V. A. Turkin, and V. G. Shemanin. "23rd International Conference "Laser Information Technologies in Medicine, Biology, Geoecological and Transport-2015"." *Vestnik gosudarstvennogo morskogo universiteta im. admirala F. F. Ushakova* 2(15) (2016): 76–81.

6. Popova, T. V., O. G. Kourova, and E. G. Kokoreva. "Method of gas discharge visualization in the investigation of the influence of physical loads on the organism." *Stredoevropsky Vestnik pro Vedu a Vyzkum* 60 (2015): 24.
7. Glukhova, N. V. "Metod rascheta neopredelennosti izmerenii geometricheskikh parametrov ga-zorazryadnykh izobrazhenii." *Sistemi obrobki informatsii* 6 (2016): 32–35.
8. Karetnikov, Vladimir V., Sergei V. Kozik, and Irina A. Sokolova. "Influence of fatigue skipper on ensuring security of navigation." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 9.2 (2017): 272–279. DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-2-272-279.
9. Özsever, Barış, and Leyla Tavacıoğlu. "Analysing the effects of working period on psychophysiological states of seafarers." *International Maritime Health* 69.2 (2018): 84–93. DOI: 10.5603/IMH.2018.0013.
10. Yuli, Yuliani, Wisnu Handoko, and Anissofiah Azise Wijinurhayati. "Human factors in vessel safety operation: a study of Indonesian seafarers." *Ponte Academic Journal* 73.10 (2017). DOI: 10.21506/j.ponte.2017.10.21.
11. Jeon, Jun Woo, Ying Wang, and Gi Tae Yeo. "Ship Safety Policy Recommendations for Korea: Application of System Dynamics." *The Asian Journal of Shipping and Logistics* 32.2 (2016): 73–79. DOI: 10.1016/j.ajsl.2016.06.003.
12. Akyuz, Emre, and Metin Celik. "Utilisation of cognitive map in modelling human error in marine accident analysis and prevention." *Safety science* 70 (2014): 19–28. DOI: 10.1016/j.ssci.2014.05.004.
13. Dimitrakiev, D., V. Stankov, and K. Atanasova. "Procedures for improving safety in the shipping activities." *Nauchni trudove–Visshe voennomorsko uchilishche „N.I. Vaptsarov“* 32 (2017): 5–11. DOI: 10.14748/scnvna.v32i0.4488.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Лысенко Юрий Николаевич —

доцент

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

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

e-mail: kaf_svvp@gumrf.ru

Соколов Андрей Игоревич —

ст. преподаватель

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

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

e-mail: kaf_svvp@gumrf.ru

Соколова Ирина Александровна —

кандидат технических наук, директор по развитию
СПб ГБУЗ «Городская больница Святого

Великомученика Георгия»

194354, Российская Федерация, Санкт-Петербург,
Северный пр., 1

e-mail: sokolova.ia@mail.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Lisenko, Uriy N. —

Associate professor

Admiral Makarov State University of Maritime
and Inland Shipping

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

e-mail: kaf_svvp@gumrf.ru

Sokolov, Andrei I. —

Senior Lecturer

Admiral Makarov State University of Maritime
and Inland Shipping

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

e-mail: kaf_svvp@gumrf.ru

Sokolova, Irina A. —

PhD,

Director of Development

City hospital of St. George

1 Severniy Av., St. Petersburg, 194354,
Russian Federation

e-mail: sokolova.ia@mail.ru

Статья поступила в редакцию 15 октября 2019 г.

Received: October 15, 2019.

DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-6-1011-1025

REVIEW OF SEARCH AND RESCUE DRIFTING OBJECT AT SEA POSSIBLE LOCATION ESTIMATION TECHNIQUES

Y. Y. Selezen

Admiral Ushakov Maritime State University, Novorossiysk, Russian Federation

Review of estimation techniques of possible location of search and rescue drifting object at sea has been presented in the paper. The factors influencing on the possible location of search and rescue drifting object at sea are considered. The main characteristics and restrictions of the reviewed techniques have been researched. Estimation techniques of possible location of search and rescue drifting object at sea are classified into analytical and numerical. The classification criterion is an approach to present possible location at drift simulation.

The analytical techniques are based on the representation of possible location by geographical points set, used as a reference in search planning (datum points). The simulation of drift influence on the possible location is carried out by moving the datum points and correcting estimated error in the datum position.

The numerical techniques are based on the representation of possible location by an ensemble of virtual drifting units. The virtual drifting unit (replication) is the information equivalent of search and rescue object. The simulation of drift influence on possible location is carried out by moving replications positions according to generation of random value of the search and rescue object drift.

Advantage of applying numerical techniques over analytical has been substantiated in the paper. The performed analysis has showed that the existing techniques are using a number of significant assumptions, which constraints their applicability. Proceeding from this, the necessity of developing an improved search and rescue drifting object at sea possible location estimation technique, which eliminates the shortcomings of existing techniques, with a focus on the numerical approach is based.

Keywords: search and rescue, search and rescue object, possible area, search area, leeway, surface drift, distress at sea.

For citation:

Selezen, Yaroslav Y. "Review of search and rescue drifting object at sea possible location estimation techniques." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 11.6 (2019): 1011–1025. DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-6-1011-1025.

УДК 656.61

АНАЛИЗ МЕТОДИК ОПРЕДЕЛЕНИЯ ВОЗМОЖНОГО МЕСТОПОЛОЖЕНИЯ ОБЪЕКТА ПОИСКА И СПАСАНИЯ НА МОРЕ С УЧЕТОМ ДРЕЙФА

Я. Ю. Селезень

ФГБОУ ВО «Государственный морской университет им. адм. Ф. Ф. Ушакова»,
г. Новороссийск, Российская Федерация

В работе представлены результаты анализа методик определения возможного местоположения объектов поиска и спасания на море с учетом дрейфа. Рассматриваются факторы, влияющие на возможное местоположение объектов поиска и спасания на море при дрейфе. Исследованы основные характеристики методик и их ограничения. Методики классифицированы на численные и аналитические. В качестве классифицирующего признака использован способ представления возможного местоположения при моделировании дрейфа. Аналитические методики основаны на представлении возможного местоположения геометрической фигурой, построенной относительно множества географических точек, используемых в качестве ориентиров в планировании поиска (исходных точек). Моделирование влияния дрейфа на возможное местоположение объекта поиска и спасания осуществляется смещением исходных точек и изменением расчетной погрешности в определении положения исходного пункта. Численные методики основаны на представлении возможного местоположения совокупностью достаточно большого числа виртуальных дрейфующих единиц, расположенных в пространстве согласно распределению вероятностей локализации объекта поиска и спасания. Виртуальная дрейфующая единица (репликация) является

информационным эквивалентом объекта поиска и спасания. Моделирование влияния дрейфа на возможное местоположение объекта поиска и спасания осуществляется смещением положений репликаций согласно реализациям случайной величины дрейфа объекта поиска и спасания.

В работе обосновывается преимущество применения численных методик перед аналитическими. Выполненный анализ показывает, что имеющиеся методики используют ряд существенных допущений, что ограничивает их применимость. Исходя из этого обосновывается необходимость разработки усовершенствованной методики определения возможного местоположения объектов поиска и спасания на море с учетом дрейфа, разрешающей недостатки имеющихся, с ориентировкой на численный подход.

Ключевые слова: поиск и спасание, объект поиска и спасания, возможный район, район поиска, дрейф в подветренную сторону, поверхностный дрейф, бедствие на море.

Для цитирования:

Селезень Я. Ю. Анализ методик определения возможного местоположения объекта поиска и спасания на море с учетом дрейфа / Я. Ю. Селезень // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2019. — Т. 11. — № 6. — С. 1011–1025. DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-6-1011-1025.

Введение (Introduction)

При планировании операции поиска и спасания на море одной из основных задач является определение возможного местоположения (ВМ) объектов поиска и спасания (ОПС) с учетом дрейфа. Решение данной задачи осложняется необходимостью комплексного учета влияния на ВМ ОПС следующих факторов:

- наличия неопределенности в отношении последнего известного местоположения (ПИМ) ОПС;
- наличия смещения ОПС при дрейфе;
- изменения неопределенности местоположения ОПС при дрейфе ввиду того, что расчетные скорости и результирующие расстояния дрейфа являются неточными величинами;
- наличия изменчивости характера условий окружающей среды, в частности, ветра и течения на различных участках пространства возможных местоположений ОПС и их непостоянство во времени.

Различными авторами предложены методики определения ВМ ОПС при дрейфе с целью решения указанной задачи и комплексного учета перечисленных факторов. Данные методики применяются после составления сценария ситуации, когда установлен исходный пункт (ИП) ПИМ ОПС, известны предполагаемые характеристики дрейфа ОПС и необходимо определить ВМ к некоторому моменту времени, как правило, ко времени начала поиска. Несмотря на многочисленность и разнообразие существующих методик, проведенный анализ показывает, что имеющиеся методики в недостаточной мере позволяют разрешить проблему комплексного учета указанных факторов в определении ВМ ОПС.

Цель настоящего исследования заключается в комплексном анализе существующих методик определения ВМ, а также определении наиболее перспективных подходов и направлений дальнейшего развития методик определения ВМ.

Методы и материалы (Methods and Materials)

В работе использованы следующие методы научного исследования: систематизация специальной литературы и источников, классификация имеющихся современных методик по поиску и спасанию на море, их качественная компаративистика и интерпретация. В настоящее исследование включены методики, имеющие возможность определения ВМ, при этом ряд рассматриваемых методик предполагает получение следующих данных: возможного района, района поиска, а также оптимального района поиска. Исследуемые методики приводятся в рамках используемой их авторами категории района. Под возможным районом понимается наименьший район, включающий все возможные местоположения оставшихся в живых или ОПС, не противоречащие фактам и допущениям, использованным при разработке сценария. Под районом поиска понимается район, подлежащий обследованию поисково-спасательными средствами. Под оптимальным районом поиска понимается район поиска, в котором при равномерном распределении обеспечиваемого поискового усилия вероятность успеха будет наивысшей [1].

Результаты (Results)

Методика «Руководства по международному авиационному и морскому поиску и спасению» (МАМПС) [1]–[5]. Методика «Руководства МАМПС» (т. II) основана на получении возможного района и оптимального района поиска ОПС из представительного множества исходных точек ИП ПИМ ОПС, смещенных под действием дрейфа и откорректированных на величину увеличения вероятной погрешности определения местоположения [1].

ИП ПИМ ОПС представляется в виде исходной точки или совокупности исходных точек. Если этим пунктом является исходная линия или исходный район, то применяется прием выбора представительного множества точек исходной линии или исходного района в качестве исходных точек. В качестве представительного множества точек выбираются угловые и / или центральные точки ячеек координатной сетки карты вероятностей или другие. Выбранное множество исходных точек должно отражать все значительные различия в характеристиках ветра и течений в пределах исходной линии или исходного района. В результате новая исходная линия или новый исходный район, получаемые вследствие дрейфа, определяется множеством смещенных исходных точек. В свою очередь, исходные точки характеризуются географическими координатами и вероятной погрешностью определения (ВПО) местоположения. Координаты исходных точек с учетом дрейфа определяются посредством перемещения исходных точек ПИМ в направлении вектора суммарного дрейфа на расстояние, равное расчетному расстоянию дрейфа за необходимый интервал времени. При этом интервал времени делится на такие подынтервалы, при которых условия дрейфа считаются неизменными.

Суммарная скорость дрейфа определяется как сумма вектора скорости дрейфа в подветренную сторону (ДвПС) с вектором скорости суммарного водного течения. В качестве ключевых параметров ДвПС ОПС используется величина модуля скорости ДвПС и углы расхождения при ДвПС (далее — углы дивергенции), задающие направление векторов скорости ДвПС относительно линии ветра. Величина модуля скорости ДвПС определяется в качестве зависимости от скорости ветра и типа ОПС, а угол дивергенции — в качестве зависимости от типа ОПС. При ДвПС по линии ветра получают один новый ИП, что характерно для случая, когда углом дивергенции можно пренебречь вследствие его малости, как показано на рис. 1. При ДвПС с расхождением относительно линии ветра первый интервал дрейфа даст два новых ИП: по одному для каждого из векторов ДвПС, как показано на рис. 2. В последующем предполагается, что для «левого» ИП всегда используется вектор ДвПС, расположенный слева от направления ветра, для «правого» ИП — вектор ДвПС, расположенный справа от направления ветра.

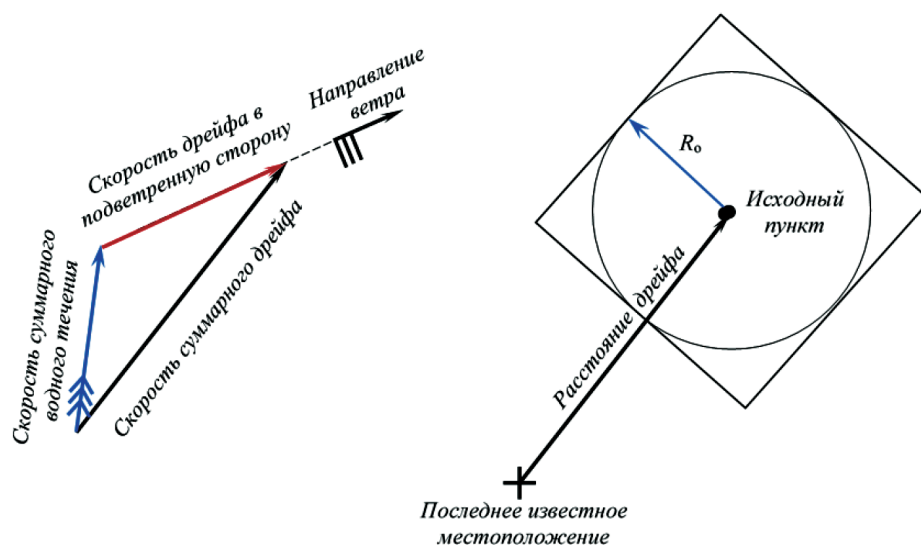


Рис. 1. Район поиска относительно одной исходной точки согласно «Руководству МАМПС»

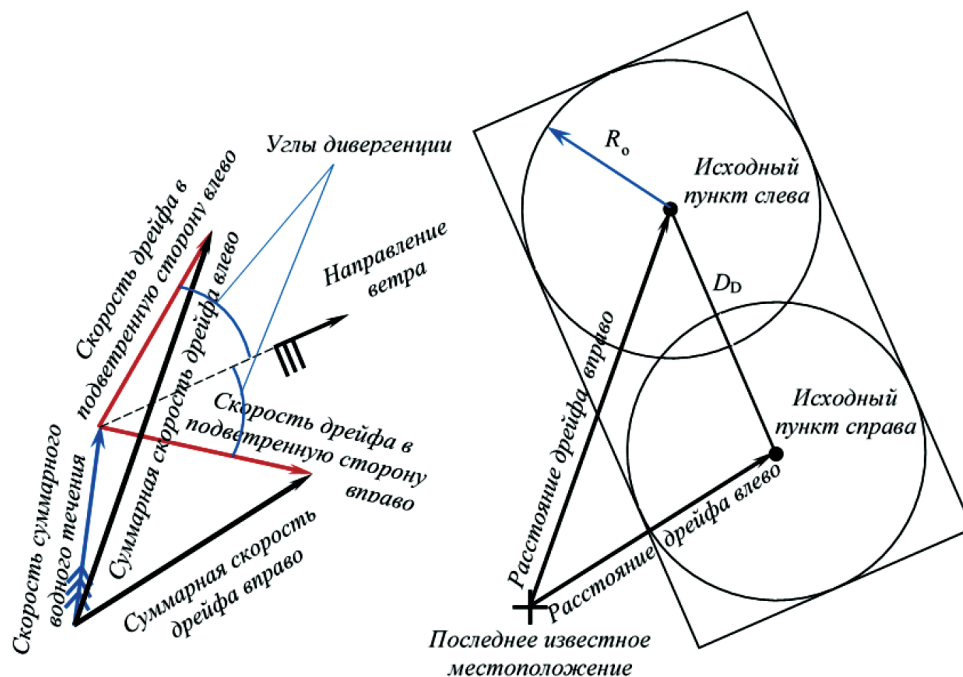


Рис. 2. Район поиска при двух исходных пунктах, полученных в результате расхождения при дрейфе в подветренную сторону при $D_0 \leq 4E$ согласно «Руководству МАМПС»

Суммарная ВПО местоположения E рассчитывается для каждой из полученных исходных точек и определяется выражением

$$E = \sqrt{X^2 + Y^2 + D_e^2}, \quad (1)$$

где X — ВПО исходного местоположения;

Y — ВПО местоположения поисковым средством с учетом его навигационных возможностей;

D_e — суммарная ВПО дрейфа $D_e = D_{ve} \cdot t$;

t — временной интервал дрейфа;

D_{ve} — суммарная ВПО скорости дрейфа.

В свою очередь, суммарная ВПО скорости дрейфа определяется по формуле

$$D_{ve} = \sqrt{A_{SWDve}^2 + T_{we}^2 + L_{we}^2}, \quad (2)$$

где A_{SWDve} — ВПО скорости дрейфа, обусловленная погрешностью определения среднего приземного ветра;

T_{we} — ВПО расчетного суммарного водного течения;

L_{we} — ВПО расчетной величины ДвПС.

При получении двух ИП вследствие расхождения при ДвПС значения суммарной ВПО местоположения для правого и левого ИП, как правило, принимаются равными друг другу.

В результате применения данной методики составляется карта вероятностей возможного района с учетом дрейфа и определяется оптимальный район поиска. В общем случае, карта вероятностей возможного района с учетом дрейфа составляется путем переноса на дистанцию дрейфа и увеличения координатной сетки карты возможного района ПИМ с учетом любого увеличения суммарной ВПО местоположения, а в случае, если силы дрейфа в районе различаются, то дополнительно изменением формы ячеек и составлением новой регулярной сетки. Следует отметить, что «инструкции по подготовке первоначальных карт вероятностей» и шаблоны для построения карт вероятностей [1] при поиске относительно двух ИП, полученных в результате расхождения при ДвПС, в «Руководстве МАМПС» отсутствуют, так как ситуация оказывается настолько сложной

из-за изменений соотношения между дистанцией расхождения и ВПО местоположения, что отобразить ее на шаблонах для построения карт вероятностей практически невозможно.

При получении после учета дрейфа одной исходной точки оптимальный район поиска представляет оптимальный квадрат, стороны которого касаются окружности оптимального радиуса, при этом центром такой окружности является полученная исходная точка, а стороны квадрата рекомендуется ориентировать по направлению дрейфа, как показано на рис. 1. Площадь района в таком случае составляет

$$A_0 = 4R_0^2, \quad (3)$$

где A_0 — площадь оптимального района поиска;

R_0 — оптимальный радиус поиска.

При получении двух ИП вследствие расхождения при ДвПС, если дистанция расхождения D_D между двумя новыми ИП в течение всего периода дрейфа не превышает четырех суммарных ВПО местоположения $4E$, $D_D \leq 4E$, оптимальный район поиска представляет оптимальный прямоугольник, стороны которого касаются окружностей оптимального радиуса, центрами которых являются соответствующие исходные точки, как показано на рис. 2, с площадью

$$A_0 = (4R_0^2) + (2R_0 D_D). \quad (4)$$

При получении двух ИП вследствие расхождения при ДвПС, если дистанция расхождения при ДвПС в течение всего периода дрейфа больше значения четырех суммарных ВПО местоположения $D_D > 4E$, на усмотрение специалиста, планирующего поиск, два новых ИП рассматриваются либо как две отдельные исходные точки, каждой из которых соответствует свой район поиска, либо как конечные точки базисной части исходной линии, относительно которой определяется район поиска, являющийся общим для данных исходных точек. В первом случае будет получено два отдельных, как правило, не перекрывающихся района поиска, каждый из которых представляет собой оптимальный квадрат, построенный аналогично построению района с одной исходной точкой. Такой подход допустим, если считать, что при небольших суммарных ВПО местоположения и значительном угле дивергенции очень мала вероятность того, что ОПС окажется на полпути между левым и правым ИП [1]. Во втором случае между двумя ИП проводится соединительная линия, которая рассматривается в качестве базисной части исходной линии, при этом будет получен один оптимальный район поиска, представляющий собой прямоугольник, большая ось которого совпадает с исходной линией. Для определения общей длины исходной линии рекомендовано ее базисную часть удлинить с обеих концов на величину суммарной ВПО местоположения E . Ширина оптимального района, как и в ранее рассмотренных случаях, равна удвоенному оптимальному радиусу. В случае необходимости длина и ширина района поиска могут быть скорректированы сотрудником, планирующим поиск, с учетом формы распределения вероятностей локализации ОПС [1]. При этом площадь оптимального района поиска

$$A_0 = 2R_0 L, \quad (5)$$

где L — длина исходной линии, $L = D_D + 2E$.

Целесообразность рассмотренного подхода с использованием исходной линии для получения оптимального района поиска обосновывается исходя из предположения о том, что при сильном, резко меняющем направление ветре, и исключительно сильном волнении на море или наличии крена ОПС, последний будет двигаться к точкам, расположенным на линии, соединяющей два ИП.

В общем случае оптимальный радиус поиска определяется из выражения

$$R_0 = f_s E, \quad (6)$$

где f_s — оптимальный коэффициент поиска.

Оптимальный коэффициент поиска позволяет изменять величину вероятности локализации ОПС в пределах границ оптимального района поиска путем изменения размеров получаемого

района. Применительно к исходной точки указанное свойство может быть использовано для построения семейства окружностей, в которых с заданной вероятностью (вероятностью локализации) находится ОПС. В данной методике оптимальный коэффициент определяются как значение, основанное на величине поискового усилия, и фактически выражается функциональной зависимостью от совокупного относительного поискового усилия и условий поиска.

Данная методика имеет компьютерную реализацию в виде системы «Поиск – Море» [2]–[4]. В ряде ситуаций решение задачи планирования поиска по настоящей методике может оказаться настолько сложным, что в этом случае, в соответствии с «Руководством МАМПС» (т. II), сотрудникам, планирующим поиск, рекомендует тщательно произвести необходимые упрощения.

Методика «Руководства МАМПС» (т. III) основана на рассмотренной методике (т. II), с принятием при этом следующих упрощений [5]:

- расчет дрейфа в подветренную сторону осуществляется без учета расхождения относительно линии ветра, при этом параметры дрейфа ОПС, дрейфующих со значительным смещением относительно линии ветра, не приводятся;
- получение района поиска рассматривается только относительно одной исходной точки;
- район поиска представляет собой квадрат, по площади равный имеющемуся поисковому усилию, а не район оптимального поиска или возможный район, охарактеризованный картами вероятностей.

Методика определения возможного местоположения свободно плавающего объекта с использованием формул оценки точности счисления [6]–[8]. Данная методика [6], [7], применительно к целям расчета ВМ ОПС, изложена в работе [8]. В ней ИП ПИМ ОПС задается исходной точкой. Дрейф ОПС рассчитывается аналогично методике «Руководства МАМПС» для одной исходной точки [6]. Точность определения ВМ ОПС рассчитывается по формулам оценки точности счисления и характеризуется окружностью или квадратом с вписанной в него окружностью. Размер окружности, в которой с заданной вероятностью (вероятностью локализации) находится ОПС, определяется радиусом [6]–[8]:

$$R = r\sqrt{M_0^2 + M_{dr}^2}, \quad (7)$$

где r — коэффициент (нормированная радиальная погрешность), равный заданной радиальной погрешности в долях радиальной среднеквадратической погрешности (СКП) места;

M_0 — радиальная СКП исходного местоположения;

M_{dr} — радиальная СКП оценки суммарного дрейфа ОПС,

$$M_{dr} = t\sqrt{m_v^2 + \left(\frac{m_\tau V}{57,3^\circ}\right)^2}. \quad (8)$$

Здесь m_v — СКП определения суммарной скорости дрейфа;

m_τ — СКП определения направления суммарного дрейфа;

V — суммарная скорость дрейфа.

Методика MiniMax «Канадского национального дополнения к «Руководству МАМПС»» [9]–[11]. В данной методике ИП ПИМ ОПС задается исходной точкой. Дрейф ОПС рассчитывается аналогично методике «Руководства МАМПС» для двух ИП, полученных при ДвПС с расхождением относительно линии ветра. В то же время данная методика отличается в части расчета суммарной ВПО местоположения и района поиска.

После получения двух ИП, из-за расхождения при ДвПС, определения координат ИП и дистанции расхождения между ИП, рассчитываются частные ВПО дрейфа для каждого ИП. В общем случае частная ВПО дрейфа определяется по формуле [9]–[11]:

$$d_e = dC_f, \quad (9)$$

где d — расстояние дрейфа;

C_f — коэффициент достоверности ВПО дрейфа (0,125–0,3 выбирается в зависимости от степени доверия к используемым данным).

The diagram is divided into two parts. The left part shows a vector triangle for drift and current. It includes vectors for 'Скорость дрейфа в попутную сторону влево' (Drift speed to the left), 'Скорость дрейфа в попутную сторону вправо' (Drift speed to the right), 'Скорость суммарная водного течения' (Sum of water current speed), 'Суммарная скорость дрейфа влево' (Sum of drift speed to the left), 'Суммарная скорость дрейфа вправо' (Sum of drift speed to the right), and 'Направление ветра' (Wind direction). It also mentions 'Углы дивергенции' (Divergence angles). The right part shows a search area on a map with concentric circles. It labels 'Последнее известное местоположение' (Last known position), 'Исходный пункт MiniMax' (Initial point MiniMax), and various distances: $d_{e\ max}$, $d_{e\ min}$, D_0 , R_0 , and D_e . Points A, B, and E are marked on the circles.

В одном варианте методики ИП MiniMax считается середина отрезка, соединяющего два ИП, полученных в результате расхождения при ДвПС [9] (отрезок D_D на рис. 3). В другом варианте ИП MiniMax считается середина отрезка, проходящего между двумя ИП, полученными в результате расхождения при ДвПС, и соединяющего внешние стороны окружностей частной ВПО дрейфа данных ИП [10] (отрезок AB на рис. 3). Суммарную ВПО дрейфа для ИП MiniMax рассчитывают используя выражение [9]–[11]:

где $d_{\text{e min}}, d_{\text{e max}}$ — минимальная и максимальная частная ВПО дрейфа для ИП, полученных в результате расхождения при ДвПС.

Район поиска представляет собой квадрат, стороны которого касаются окружности поиска. При этом окружность поиска строится так, что включает оба ИП, а центром окружности поиска является точка ИП MiniMax (см. рис. 3). Радиус окружности поиска рассчитывается с использованием выражения $R_0 = f_s E$. При этом коэффициент поиска f_s определяется количеством проведенных поисков, а не величиной имеющегося поискового усилия. Для первого поиска $f_s = 1,1$, в последующих поисках его пошагово увеличивают до 2,5, что соответствует пятому поиску.

Методика канадского средства планирования поиска и спасения на море «Canadian Maritime Search and Rescue Planning Tool (CANSARP)» [12]–[14]. Данная методика является модификацией ранее рассмотренной методики «Канадского национального дополнения к «Руководству МАМПС»». Район поиска определяется точно так же, как и в предыдущей методике. Далее выполняется определение области, в которой считается наиболее возможным нахождение ОПС, данная область называется *дугой вероятности*. В процессе поиска, начиная с данной области, предполагается производить развертывание поискового усилия, охватывая им весь район поиска.

Для определения дуги вероятности выполняется расчет перемещения множества исходных точек, изначально расположенных в одних и тех же географических координатах ИП ПИМ ОПС и имеющих каждая свой угол ДвПС, который остается неизменным на протяжении всего периода дрейфа. Вектор скорости ДвПС для каждой исходной точки определяется на основании частного угла ДвПС и общей для всей группы исходных точек функциональной зависимости между модулем скорости ДвПС и скорости ветра.

Расчет перемещения исходных точек выполняется с помощью сложения вектора суммарного водного течения с вектором ДвПС отдельно для каждой исходной точки. Из всей группы исходных точек две точки дрейфуют относительно поверхности воды по направлению углов дивергенции в правую и левую сторону, для остальных исходных точек определяются углы ДвПС, исходя из деления суммы правого и левого углов дивергенции на равные углы между соседними исходными точками [12] — рис. 4.

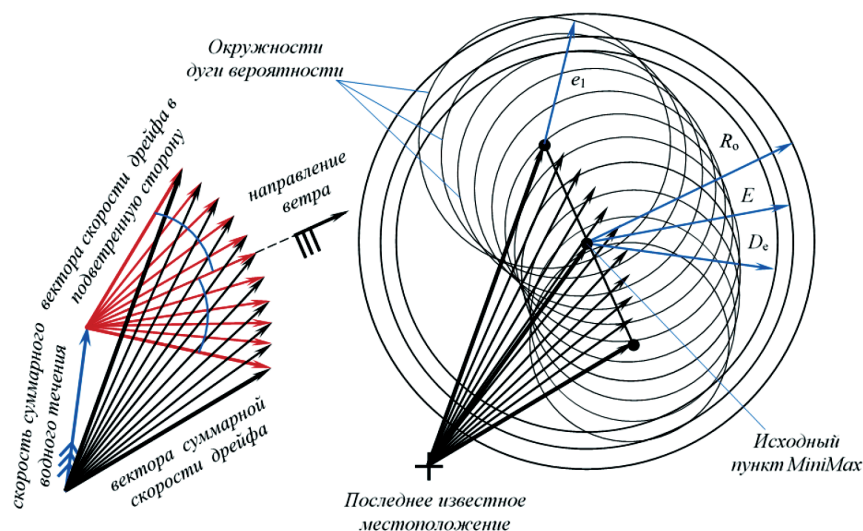


Рис. 4. Район поиска согласно методике Canadian Maritime Search and Rescue Planning Tool

После определения новых координат исходных точек рассчитывается частная ВПО местоположения e_i относительно каждой i -й исходной точки, включая две исходные точки, дрейфующие относительно поверхности воды по направлению углов дивергенции [13]:

$$e_i = \sqrt{d_{ei}^2 + X^2}. \quad (11)$$

Дуга вероятности местоположения ОПС представляет собой область, ограниченную совокупностью окружностей, построенных относительно каждой i -й исходной точки с радиусом частной ВПО местоположения. Дуга вероятности построена с использованием одиннадцати исходных точек, две крайние из которых представляют собой точки, дрейфующие относительно поверхности воды по направлению углов дивергенции. Двенадцатая новая исходная точка, находящаяся в центре окружности оптимального радиуса, является ИП MiniMax. Пример построения оптимального района поиска приведен на рис. 4. Данная методика представлена авторами в компьютерной реализации [12]–[14].

Методика морского университета в г. Гдыне [15]–[17]. В данной методике ИП ПИМ ОПС задается исходной точкой, при этом считается, что форма района поиска может изменяться от круговой до эллиптической в процессе дрейфа [15]. Исходя из этого район поиска может быть представлен прямоугольником со вписанным эллипсом или непосредственно самим эллипсом (семейством эллипсов), в котором с заданной вероятностью (вероятностью локализации) находится ОПС. Прежде всего, данную методику отличает способ учета дрейфа. Так, новые координаты ИП определяют перемещением ИП по направлению вектора ДвПС и вектора водного течения, исключая крайнюю составляющую ветрового течения. При этом направление вектора ДвПС считают совпадающим с направлением вектора ветра. Влияние составляющей ветрового течения на ВМ ОПС автор методики Z. Węsiński предлагает учитывать в виде изменяющихся элементов охватывающего район эллипса. Эллипс с полуосями l_1 и l_2 , расположенными, соответственно, по направлению обратного курса ветра и перпендикулярно к направлению ветра l_2 , показан на рис. 5.

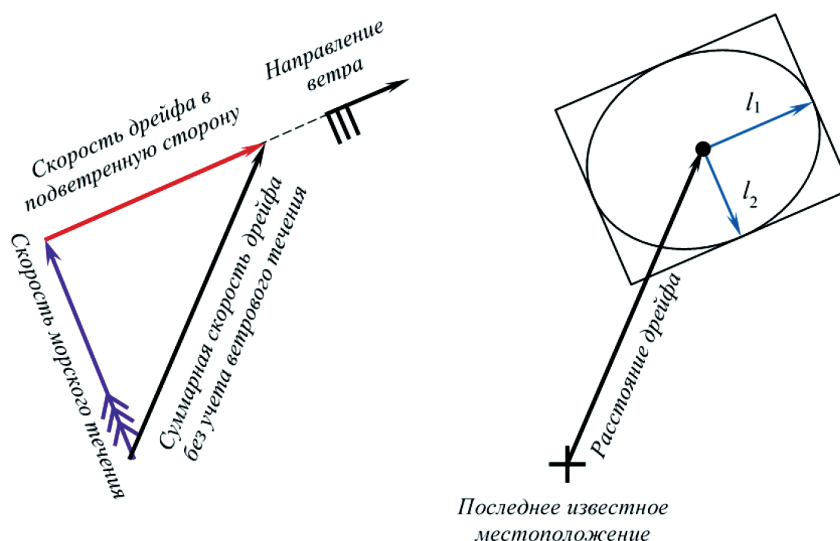


Рис. 5. Район поиска по методике морского университета в г. Гдыне

Влияние со стороны дрейфа на размеры полуосей эллипса описано следующими выражениями [15]–[16]:

$$l_1(t) = (V_{pr} + B_{tr})t + W_{SE}(t); \quad (12)$$

$$l_2(t) = (\sin(K_p - K_w)V_{pr})t + W_{DE}(t), \quad (13)$$

где l_1 — длина ориентированной по направлению ветра полуоси эллипса;
 l_2 — длина ориентированной перпендикулярно направлению ветра полуоси эллипса;
 V_{pr} — скорость ветрового течения, являющаяся функцией скорости ветра W ;
 B_{tr} — погрешность оценки скорости ДвПС, обусловленная влиянием загрузки ОПС;
 W_{SE} — составляющая, обусловленная влиянием погрешности определения скорости ветра;
 K_p — направление ветрового течения, представлено функцией скорости ветра и K_w ;
 K_w — направление ветра (обратный курс ветра);
 W_{DE} — составляющая, обусловленная влиянием погрешности определения направления ветра.

При этом, согласно выражениям источника [15], запишем:

$$W_{DE}(t) = \sin \alpha \cdot V_{tr}t; \quad (14)$$

$$W_{SE}(t) = q\Delta Wt, \quad (15)$$

где V_{tr} — скорость ДвПС в исследовании Burgiu [15], заданная в виде полинома от 4-й до 7-й степени по переменной — скорости ветра W ;

α — погрешность определения направления ветра;

ΔW — погрешность определения скорости ветра;

q — коэффициент, определяющий приращение, обусловленное влиянием погрешности определения скорости ветра (для спасательных плотов приводится в зависимости от наличия плавучего якоря).

Данная методика имеет компьютерную реализацию «Search and Rescue Computer Aided System SARCAS 2000» [17].

Методика компьютерной системы поддержки планирования поиска «Computer Assisted Search Planning (CASP)» [18], [19]. Данная методика основана на представлении возможного местоположения при дрейфе ОПС совокупностью достаточно большого числа виртуальных дрейфующих единиц. Виртуальная дрейфующая единица является информационным эквивалентом объекта поиска и спасания. Дрейфующие единицы названы *репликациями ОПС*, а их совокупность — *ансамблем*. Репликации определяют ВМ и характер распределения вероятностей ВМ ОПС. Вероятность локализации ОПС в области пространства (например, ячейки координатной сетки), где находится некоторое количество репликаций ОПС, определяется суммой весов данных репликаций, при этом между собой они имеют равный вес. Репликации изначально расположены в районе случайным образом в соответствии с заданным начальным законом распределения плотности вероятностей местоположения ОПС. Репликации не взаимодействуют между собой и имеют дрейфовые характеристики ОПС с учетом их возможных значений. В общем случае дрейфовые характеристики репликаций задаются из значений смоделированной случайной величины дрейфа ОПС. В частности, вектора ДвПС в данной методике строятся следующим образом [18], [19]:

– для каждой репликации выбирается угол ДвПС случайным образом из равномерного распределения между максимально левым и правым углом дивергенции, при этом угол ДвПС в репликации поддерживается на протяжении всего времени моделирования дрейфа;

– для каждой репликации в интервале $(k \pm 1/3k) \cdot W$ выбирается модуль скорости ДвПС случайным образом из равномерного закона распределения исходя из значения множителя скорости ДвПС k и скорости ветра W , при этом модуль скорости ДвПС в репликации поддерживается на протяжении всего цикла моделирования дрейфа. Значение множителя скорости ДвПС k соответствует коэффициенту дрейфа в подветренную сторону.

Таким образом, если все репликации в начальный момент дрейфа сгенерировать с одним и тем же значением координат и выполнить расчет их ДвПС, то полученный район будет представлять собой дугу, внутри которой репликации распределены равномерно случайным образом, ограниченную правым и левым углами дивергенции, а также верхним и нижним смещением (рис. 6).

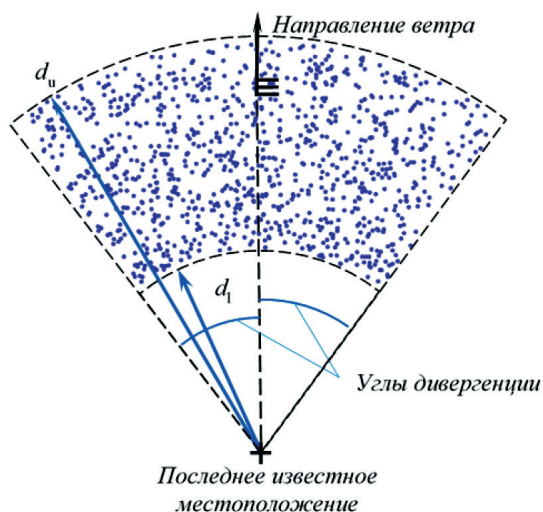


Рис. 6. Возможный район объекта поиска и спасания, полученный с использованием методики Computer Assisted Search Planning

При этом площадь такого района можно определить из выражений [19]:

$$S = (\alpha_D \cdot \pi / 180) \cdot (d_u^2 - d_l^2); \quad (16)$$

$$d_{u,l} = (k \pm 1/3k) \cdot Wt, \quad (17)$$

где α_D — угол дивергенции в градусах;

d_u, d_l — соответственно верхнее и нижнее смещение.

Методика моделирования распределения дрейфа в подветренную сторону [19]–[28].

Данная методика также определяет возможное местоположение ОПС с использованием подхода, основанного на моделировании дрейфа ансамблем репликаций [19]. В отличие от ранее рассмотренной методики, в качестве ключевых параметров модели ДвПС используется функциональная зависимость между составляющими скоростей дрейфа ОПС относительно поверхности воды по направлению обратного курса ветра и бокового смещения относительно линии ветра от его скорости. Вектора ДвПС для каждого члена ансамбля получают из уравнений парной линейной регрессии для составляющих скорости ДвПС по направлению обратного курса ветра L_d и бокового смещения вправо L_{+c} и влево L_{-c} соответственно. Для каждого члена ансамбля с учетом случайных возмущений коэффициента ДвПС имеют место следующие выражения для расчета скорости ДвПС [20]–[22]:

$$L_{d, \pm A} = a_{d, \pm A} \cdot W + b_{d, \pm A}, \quad (18)$$

где $a_{d, \pm c}, b_{d, \pm c}$ — коэффициенты линейной регрессии ДвПС с учетом возмущения, позволяющие ансамблю воспроизводить гетероскедастичность: $a_{d, \pm c} = \hat{a}_{d, \pm c} + \varepsilon_{d, \pm c}/20$, $b_{d, \pm c} = \hat{b}_{d, \pm c} + \varepsilon_{d, \pm c}/2$;

$\hat{a}_{d, \pm c}, \hat{b}_{d, \pm c}$ — коэффициенты линейной регрессии ДвПС;

$\varepsilon_{d, \pm c}$ — случайная ошибка модели, имеющая нормальное распределение с математическим ожиданием, равным нулю, и известным полученным экспериментально среднеквадратическим отклонением $\sigma_{d, \pm c}$.

Ориентация векторов ДвПС членов ансамбля относительно линии ветра распределена одинаково и остается неизменной во время моделирования, за исключением моделирования эффекта случайной смены ориентации вектора ДвПС относительно линии ветра. Пример района, полученного при расчете ДвПС, если все репликации в начальный момент дрейфа сгенерировать с одним и тем же значением координат, представлен на рис. 7.

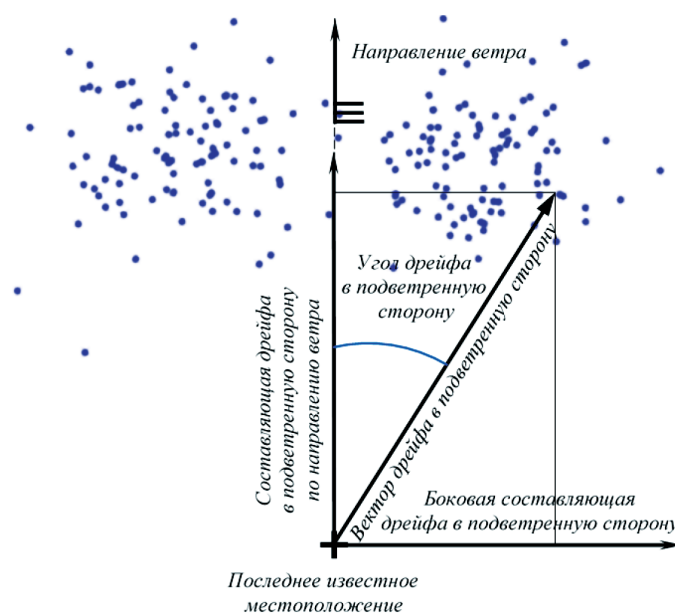


Рис. 7. Возможный район объекта поиска и спасания, полученный с использованием методики моделирования распределения дрейфа в подветренную сторону

Целесообразно отметить, что данная методика, в отличие от предыдущей, более достоверно моделирует физический процесс дрейфа, что прежде всего обусловлено выбором качества ключевых параметров ДвПС, составляющих ДвПС по направлению обратного курса ветра и бокового смещения относительно линии ветра. В настоящее время активно исследуются возможности использования данной методики с учетом особенностей конкретной акватории и дрейфовых свойств потенциально возможных ОПС определенного типа [22]–[26]. Примером компьютерных программ, основанных на данной методике, являются: «Search and Rescue Optimal Planning System» [20]; «OpenDriftv1.0» [27]; «Search and Rescue Model and Response System» [28].

Обсуждение (Discussion)

Для рассмотренных методик можно выделить в качестве признака способ представления возможного местоположения при моделировании дрейфа. По данному признаку методики определения ВМ можно классифицировать на *аналитические* и *численные*. Аналитические методики основаны на представлении ВМ геометрической фигурой, построенной относительно множества исходных точек. Моделирование влияния дрейфа на возможное местоположение объекта поиска и спасения осуществляется смещением местоположения исходных точек и изменением погрешности определения местоположения. Различные виды ИП ПИМ ОПС (исходная линия, исходный район) частично могут моделироваться путем их представления совокупностью исходных точек. Учет изменения неопределенности местоположения ОПС в процессе дрейфа ОПС реализуется за счет изменения геометрической фигуры, построенной относительно исходных точек, в которой с некоторой вероятностью (вероятностью локализации) находится ОПС. Достоверность моделирования зависит от наличия ограничений в представлении конкретной геометрии района и характера вероятностей локализации ОПС множеством исходных точек, а также качества разработанных моделей дрейфа. Численные методики основаны на представлении ВМ совокупностью достаточно большого числа репликаций ОПС, расположенных в пространстве согласно распределению вероятностей локализации ОПС. Моделирование влияния дрейфа на возможное местоположение объекта поиска и спасения осуществляется смещением положений репликаций согласно реализациям случайной величины дрейфа объекта поиска и спасения. Учет изменения неопределенности местоположения ОПС при моделировании дрейфа ОПС реализуется за счет изменения плотности репликаций в пространстве [29]. При этом достоверность моделирования с использованием численных методик прежде всего зависит от количества репликаций, а также от качества разработанных моделей дрейфа.

Заключение (Conclusion)

Таким образом, комплексное исследование имеющихся методик и их компаративный анализ свидетельствуют о том, что ключевым преимуществом численных методик перед аналитическими является их гибкость в возможности представления различных видов ИП при дрейфе, в том числе с вероятностью распределения локализации ОПС, нехарактерной для аналитических законов представления случайных величин. Кроме того, использование численных методик позволяет более полно учесть различие влияний условий внешней среды в различных точках района на оценку предполагаемого местоположения и состояния ОПС при его дрейфе. Кроме того, следует особо отметить, что в существующих методиках определения ВМ ОПС довольно проблематичным остается математический компонент учета параметров дрейфа, не позволяющий учесть влияние некоторых факторов внешней среды на движение ОПС [30], [31]. Такая ситуация, на наш взгляд, актуализирует целесообразность усовершенствования математической модели морского дрейфа ОПС, а также способствует поиску новых методик определения ВМ ОПС с ориентировкой на численные подходы к решению этой задачи.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Руководство по международному авиационному и морскому поиску и спасанию. МАМПС: в 3 т. — Лондон: ИМО; Монреаль: ICAO, 2016. — Т. 2: Координация операций. — 562 с.

2. Поиск-Море СКЦ [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <http://poiskmore.smrcc.ru/> (дата обращения: 09.09.2019)
3. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2019615112 Российская Федерация. Модуль организации проведения поисково-спасательных операций (работ) координационного центра поиска и спасания; заяв. и патентообл. ООО «Паллада», Н. Н. Сметанин. — № 2019613897; заявл. 03.04.2019; опубл. 18.04.2019.
4. Улитенков М. В. Программный комплекс обеспечения проведения поисковых, аварийно-спасательных операций «Поиск-Море»: руководство пользователя, ред. 3.5/ М. В. Улитенков, И. К. Малютин, П. А. Тарасов; под общ. ред. Н. Н. Сметанин. — М.: ООО «Паллада», 2013. — 137 с.
5. Руководство по международному авиационному и морскому поиску и спасанию. МАМПС: в 3 т. — Лондон: ИМО; Монреаль: ИКАО, 2016. — Т. 3: Подвижные средства. — 310 с.
6. Мореходные таблицы (МТ—2000). № 9011. — СПб.: ГУНиО МО РФ, 2002. — 576 с.
7. Руководство по оценке точности кораблевождения (РОТК). № 9341. — Л.: ГУ МО СССР, 1970. — 86 с.
8. Бень А. П. Выход в исходную точку поиска в кратчайшее время при осуществлении поисково-спасательных операций / А. П. Бень, В. Н. Плющ // Научный вестник Херсонского Государственного Морского Института. — 2010. — № 1 (2). — С. 24–35.
9. Canadian Aeronautical and Maritime Search and Rescue Manual: Supplement to the IAMSAR Manual: Combined edition Vols. I, II, III. — Canada: Canadian Coast Guard, 2014. — 522 p.
10. Коровин А. Г. Предполагаемые направления развития системы поиска и спасания в море / А. Г. Коровин // Транспортное дело России. — 2011. — № 12. — С. 215–222.
11. Yang O. Drift model for ship out of control at sea / O. Yang // 2011 Chinese Control and Decision Conference (CCDC). — IEEE, 2011. — Pp. 550–554. DOI:10.1109/CCDC.2011.5968242.
12. CANSARP V 5.0 User Manual. — Canada: Canadian Coast Guard, 2009. — 248 p.
13. CANSARP V 3.2 Technical Manual. — Vancouver: Seaconsult Marine Research Ltd, 1993. — 51 p.
14. Choinsard J. Comparison of C-band SAR algorithms to derive surface wind vectors and initial findings in their use in marine search and rescue / J. Choinsard, D. Power, F. Davidson, B. Stone, C. Howell, C. Randell // Canadian Journal of Remote Sensing. — 2007. — Vol. 33. — Is. 1. — Pp. 1–11. DOI: 10.5589/m07-002.
15. Burciu Z. SAR action effectiveness measures / Z. Burciu, A. Starosta // Journal of KONBIN — 2008. — Vol. 6. — Is. 3. — Pp. 137–152. DOI: 10.2478/v10040-008-0063-1.
16. Burciu Z. The Model of Surface Currents Field as an Element of Determining Search Domain / Z. Burciu // IFAC Proceedings Volumes. — 2003. — Vol. 36. — Is. 21. — Pp. 85–89. DOI: 10.1016/S1474-6670(17)37788-1.
17. Burciu Z. Reliability and uncertainty in determining search area during Search-and Rescue action / Z. Burciu // Polish maritime research. — 2012. — Vol. 19. — Is. 1. — Pp. 21–30. DOI: 10.2478/v10012-012-0003-9.
18. Raunig D. L. Computer Aided Search Planning (CASP) Version 1.0 Validation Interim Report: U. S. Coast Guard Informal Report / D. L. Raunig, R. Q. Robe, B. D. Perkins. — U. S. Coast Guard, Office of Engineering, Logistics, and Development, 1995. — 44 p.
19. Allen A. Review of Leeway: Field Experiments and Implementation: Report No.CG-D-08-99/ A. Allen, J. Plourde. — Groton: USCG R&D Center, 1999. — 351 p.
20. Breivik Ø. An operational search and rescue model for the Norwegian Sea and the North Sea. / Ø. Breivik, A. A. Allen // Journal of Marine Systems. — 2008. — Vol. 69. — Is. 1-2. — Pp. 99–113. DOI: 10.1016/j.jmarsys.2007.02.010.
21. Coppini G. A new search-and-rescue service in the Mediterranean Sea: A demonstration of the operational capability and an evaluation of its performance using real case scenarios / G. Coppini, E. Jansen, G. Turrisi, S. Creti, E. Y. Shchekinova, N. Pinardi, et al // Natural Hazards and Earth System Sciences. — 2016. — Vol.16. — Is.12. — Pp. 2713–2727. DOI: 10.5194/nhess-16-2713-2016.
22. Shchekinova E. Numerical reconstruction of trajectory of small-size surface drifter in the Mediterranean Sea / E. Shchekinova, Y. Kumkar, G Coppini // Ocean Dynamics. — 2016. — Vol. 66. — Is. 2. — С. 153–161. DOI: 10.1007/s10236-015-0916-9.
23. Maio A. D. Evaluation of the search and rescue LEEWAY model in the Tyrrhenian Sea: a new point of view / A. D. Maio, M. V. Martin, R. Sorgente // Natural Hazards and Earth System Sciences. — 2016. — Vol. 16. — Is. 8. — Pp. 1979–1997. DOI: 10.5194/nhess-16-1979-2016.
24. Brushett B. Application of Leeway Drift Data to Predict the Drift of Panga Skiffs: Case Study of Maritime Search and Rescue in the Tropical Pacific. / B. Brushett, A. A. Allen, B. A. King, C. J. Lemckert // Applied Ocean Research. — 2017. — Vol. 67 — Pp. 109–124. DOI: 10.1016/j.apor.2017.07.004.

25. Brushett B. A. Assessment of ocean forecast models for search area prediction in the eastern Indian Ocean / B. A. Brushett, B. A. King, C.J. Lemckert // *Ocean Modelling*. — 2016. — Vol. 97. — Pp. 1–15. DOI: 10.1016/j.ocemod.2015.11.002.
26. Усольцев И. И. Прогноз траекторий дрейфа плавающих объектов на поверхности охотского моря / И. И. Усольцев, Т. Р. Кильматов // *Международный научно-исследовательский журнал* — 2017. — № 1-2 (55). — С. 68–72. DOI: 10.23670/IRJ.2017.55.058.
27. Dagestad K.-F. OpenDriftv1.0: a generic framework for trajectory modelling / K.-F. Dagestad, J. Röhrs, Ø. Breivik, B. Ådlandsvik // *Geoscientific Model Development*. — 2018. — Vol. 11. — Is. 4. — Pp. 1405–1420. DOI: 10.5194/gmd-11-1405-2018.
28. Futch V. Search and Rescue Applications: On the Need to Improve Ocean Observing Data Systems in Offshore or Remote Locations / V. Futch, A. Allen // *Frontiers in Marine Science*. — 2019. — Vol. 6. — Pp. 301. DOI: 10.3389/fmars.2019.00301
29. Bugajski G. Using the Monte Carlo method to create probability maps for search and rescue operations at sea / G. Bugajski // *Zeszyty Naukowe Akademii Morskiej w Szczecinie*. — 2016. — No. 48 (120). — Pp. 71–74. DOI: 10.17402/178.
30. Селезень Я. Ю. Экспериментальные исследования дрейфа объектов поиска и спасания на море / Я. Ю. Селезень // *Вестник государственного морского университета им. адмирала Ф.Ф. Ушакова*. — 2016. — № 4 (17). — С. 20–23.
31. Селезень Я. Ю. Теоретические исследования дрейфа объектов поиска и спасания на море / Я.Ю. Селезень // *Эксплуатация морского транспорта*. — 2016. — Спецвыпуск. — С. 14–20.

REFERENCES

1. *International Aeronautical and Maritime Search and Rescue Manual. IAMSAR. Vol. I. Mission Co-Ordination*. London: IMO; Montreal: ICAO, 2016.
2. Poisk-More SKTs. Web. 9 Sept. 2019 <<http://poiskmore.smrec.ru/>>.
3. Smetanin, N. N. Certificate № 2019615112. Modul' organizatsii provedeniya poiskovo-spasatel'nykh operatsii (rabot) koordinatsionnogo tsentra poiska i spasaniya. Russian Federation, assignee. Publ. 18 April 2019.
4. Ulitenkov, M. V., I. K. Malyutin, and P. A. Tarasov. *Programmnyi kompleks obespecheniya provedeniya poiskovykh, avariino-spasatel'nykh operatsii «Poisk-More»*. *Rukovodstvo pol'zovatelya*. Edited by N.N. Smetanin. M.: ООО «Pallada», 2013.
5. *International Aeronautical and Maritime Search and Rescue Manual. IAMSAR. Vol. II. Mobile Facilities*. London: IMO; Montreal: ICAO, 2016.
6. *Morekhodnye tablitsy (MT—2000). № 9011*. SPb.: GUNiO MO RF, 2002.
7. *Rukovodstvo po otsenke tochnosti korablevozhdeniya (ROTK). № 9341*. L.: GU MO SSSR, 1970.
8. Ben', A. P., and V. N. Plyushch. "Vykhod v iskhodnyuyu tochku poiska v kratchaishee vremya pri osushchestvlenii poiskovo-spasatel'nykh operatsii." *Nauchnyi vestnik Khersonskogo Gosudarstvennogo Morskogo Instituta* 1(2) (2010): 24–35.
9. *Canadian Aeronautical and Maritime Search and Rescue Manual: Supplement to the IAMSAR Manual*. Combined edition Vols. I, II, III. Canada: Canadian Coast Guard, 2014.
10. Korovin, A. "Prospective directions of development of search and rescue at sea." *Transport business of Russia* 12 (2011): 215–222.
11. Yang, Ou. "Drift model for ship out of control at sea." *2011 Chinese Control and Decision Conference (CCDC)*. IEEE, 2011. 550–554. DOI:10.1109/CCDC.2011.5968242
12. *CANSARP V 5.0 User Manual*. Canada: Canadian Coast Guard, 2009.
13. *CANSARP V 3.2 Technical Manual*. Vancouver: Seaconsult Marine Research Ltd, 1993.
14. Choisnard, Julien, Desmond Power, Fraser Davidson, Brian Stone, Carl Howell, and Charles Randell. "Comparison of C-band SAR algorithms to derive surface wind vectors and initial findings in their use in marine search and rescue." *Canadian Journal of Remote Sensing* 33.1 (2007): 1–11. DOI: 10.5589/m07-002.
15. Burciu, Zbigniew, and Andrzej Starosta. "SAR action effectiveness measures." *Journal of KONBIN* 6.3 (2008): 137–152. DOI: 10.2478/v10040-008-0063-1.
16. Burciu, Zbigniew. "The model of surface currents field as an element of determining search domain." *IFAC Proceedings Volumes* 36.21 (2003): 85–89. DOI: 10.1016/S1474-6670(17)37788-1.

17. Burciu, Zbigniew. "Reliability and uncertainty in determining search area during Search-and Rescue action." *Polish Maritime Research* 19.1 (2012): 21–30.
18. Raunig, D.L., R.Q. Robe, and B.D. Perkins. *Computer Aided Search Planning (CASP) Version 1.0 Validation Interim Report: U.S. Coast Guard Informal Report*. U.S. Coast Guard, Office of Engineering, Logistics, and Development, 1995.
19. Allen, A., and J. Plourde. *Review of Leeway: Field Experiments and Implementation: Report No. CG-D-08-99*. Groton: USCG R&D Center, 1999.
20. Breivik, Øyvind, and Arthur A. Allen. "An operational search and rescue model for the Norwegian Sea and the North Sea." *Journal of Marine Systems* 69.1-2 (2008): 99–113. DOI: 10.1016/j.jmarsys.2007.02.010.
21. Coppini, Giovanni, Eric Jansen, Giuseppe Turrise, Sergio Creti, Elena Yurievna Shchekinova, Nadia Pinardi, Rita Lecci, Ivano Carluccio, Yogesh Vittal Kumkar, Alessandro D'Anca, Gianandrea Mannarini, Sara Martinelli, Palmalisa Marra, Tommaso Capodiferro, and Tommaso Gismondi. "A new search-and-rescue service in the Mediterranean Sea: a demonstration of the operational capability and an evaluation of its performance using real case scenarios." *Natural Hazards and Earth System Sciences* 16.12 (2016): 2713–2727. DOI: 10.5194/nhess-16-2713-2016.
22. Shchekinova, Elena Y., Yogesh Kumkar, and Giovanni Coppini. "Numerical reconstruction of trajectory of small-size surface drifter in the Mediterranean sea." *Ocean Dynamics* 66.2 (2016): 153–161. DOI: 10.1007/s10236-015-0916-9.
23. Maio, Antonia Di, Mathew V. Martin, and Roberto Sorgente. "Evaluation of the search and rescue LEEWAY model in the Tyrrhenian Sea: a new point of view." *Natural Hazards and Earth System Sciences* 16.8 (2016): 1979–1997. DOI: 10.5194/nhess-16-1979-2016
24. Brushett, Ben A., A. A. Allen, B. A. King, and C. J. Lemckert. "Application of leeway drift data to predict the drift of panga skiffs: Case study of maritime search and rescue in the tropical pacific." *Applied Ocean Research* 67 (2017): 109–124. DOI: 10.1016/j.apor.2017.07.004.
25. Brushett, Ben A., Brian A. King, and Charles J. Lemckert. "Assessment of ocean forecast models for search area prediction in the eastern Indian Ocean." *Ocean Modelling* 97 (2016): 1–15. DOI: 10.1016/j.ocemod.2015.11.002.
26. Usoltsev, I.I., and T.R. Kilmatov. "Forecast of leeway's trajectories of free-drifting objects on the surface of the Okhotsk sea." *International Research Journal* 1-2(55) (2017): 68–72. DOI: 10.23670/IRJ.2017.55.058.
27. Dagestad, K.-F., J. Röhrs, Ø. Breivik, and B. Ådlandsvik. "OpenDriftv1.0: a generic framework for trajectory modeling." *Geoscientific Model Development* 11.4 (2018): 1405–1420. DOI: 10.5194/gmd-11-1405-2018.
28. Futch, Victoria Carrie, and Arthur Allen. "Search and Rescue Applications: On the Need to Improve Ocean Observing Data Systems in Offshore or Remote Locations." *Frontiers in Marine Science* 6 (2019): 301. DOI: 10.3389/fmars.2019.00301.
29. Bugajski, Grzegorz. "Using the Monte Carlo method to create probability maps for search and rescue operations at sea." *Zeszyty Naukowe Akademii Morskiej w Szczecinie* 48(120) (2016): 71–74. DOI: 10.17402/178.
30. Selezén, Y.Y. "Experimental researches of the search and rescue objects drift at sea." *Vestnik gosudarstvennogo morskogo universiteta im. admirala F.F. Ushakova* 4(17) (2016): 20–23.
31. Selezén, Ya.Yu. "Teoreticheskie issledovaniya dreifa ob"ektov poiska i spasaniya na more." *Ekspluatatsiya morskogo transporta Spetsvypusk* (2016): 14–20.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Селезен Ярослав Юрьевич —
старший преподаватель
ФГБОУ ВО «Государственный морской
университет им. адм. Ф. Ф. Ушакова»
353918, Российская Федерация, г. Новороссийск,
пр. Ленина, 93
e-mail: yarselezen@gmail.com

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Selezen, Yaroslav Y. —
Senior Lecturer
Admiral Ushakov State
Maritime University
93 Lenin's Av., Novorossiysk, 353918,
Russian Federation
e-mail: yarselezen@gmail.com

Статья поступила в редакцию 8 ноября 2019 г.
Received: November 8, 2019.

SPLINE INTERPOLATION OF NAVIGATIONAL ISOLINES**I. V. Yuyukin**Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping,
St. Petersburg, Russian Federation

It is noted that spline interpolation's application has established the real possibility for the direct handling of initial navigational function in the practical tasks of navigation, giving the chance to refuse the fictitious mathematical object in the form of line of position. Constructively proposed in the work method automatically upgrades the standards of navigation accuracy due to the absolute elimination of systematic error. Two alternative approaches on the base of finite splines and classic spline-interpolation have been developed. The speeds of calculating operations and the compactness of information storage are achieved due to the compression of data files while each spline method approbation in the on-board computer. The results of test experiments are cited. The special significance of the approach's realization is emphasized in applications of astronavigation during the purposeful using of the celestial navigation means in the actual practice of nowadays. The isoline is interpreted as special case of the navigational isosurface. The understanding of physical difference between spline and the generated navigational function is demonstrated visually. The finite construction is the secondary mathematical toolkit relatively to the original navigational functional dependence. The real mathematical curve is synthesized due to the multiplication of «cap» functions sequence by calculating scalar coefficients, thus base artificial construction is formed. The geometric interpretation of reconstruction operation for hypothetical navigational isoline by basic splines methods has been illustrated. On the base of special theoretical investigation the expedience for the optimal option of cubic finite functions on the four net intervals is substantiated. The developed algorithms permit to use the corrupted by corrections navigational isolines directly for the differential mode. The corrupted isoline has complicated mathematical formalization and it is impossible to solve, in principle, the mission of fixing ship position by the traditional way. The synthesis of corrupted isolines by spline-interpolation methods does not represent the real problem within the limits of two developed approaches.

Keywords: B-spline, navigational isosurface, generated navigational function, «cap» function, net interval, corrupted isoline, differential mode.

For citation:

Yuyukin, Igor V. "Spline interpolation of navigational isolines." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 11.6 (2019): 1026–1036. DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-6-1026-1036.

УДК 656.61.052 656**СПЛАЙН-ИНТЕРПОЛЯЦИЯ НАВИГАЦИОННЫХ ИЗОЛИНИЙ****И. В. Ююкин**ФГБОУВО «ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова»,
Санкт-Петербург, Российская Федерация

Отмечается, что применение сплайновой интерполяции изолиний создает реальную возможность для непосредственного оперирования исходной навигационной функцией в прикладных задачах судовождения, предоставляя перспективу отказаться от фиктивного математического объекта в виде линии положения. Конструктивно предложенный в работе метод автоматически повышает стандарты точности навигации ввиду абсолютного устранения систематической погрешности. Разработаны два альтернативных подхода на основе финитных сплайнов и классической сплайн-интерполяции. Достигнуты быстроедействие вычислительных операций и компактность хранения информации за счет алгоритмического сжатия массивов данных навигационных параметров при апробировании в бортовом компьютере каждого сплайнового метода. Приводятся результаты тестовых экспериментов. Подчеркивается особая значимость реализации предлагаемого подхода в приложениях астронавигации при целенаправленном использовании автономности средств мореходной астрономии в реальных условиях современности. Изолиния интерпретируется как частный случай навигационная изоповерхности. Наглядно демонстрируется

понимание физического различия между сплайном и генерируемой навигационной функцией. Финитная конструкция является лишь вторичным математическим инструментарием по отношению к оригинальной навигационной функциональной зависимости. Реальная математическая кривая синтезируется путем умножения последовательности «шапочных» функций на расчетные скалярные коэффициенты, формируя тем самым базовую искусственную конструкцию. Иллюстрируется геометрическая интерпретация операции восстановления гипотетической навигационной изолинии методами базисных сплайнов. На основе специального теоретического исследования оптимальности носителя В-сплайна обосновывается целесообразность оптимального выбора кубических финитных функций на четырех сеточных интервалах. Разработанные алгоритмы позволяют напрямую использовать искаженные поправками навигационные изолинии при дифференциальном режиме. Исканная изолиния имеет сложную математическую формализацию и традиционным путем задачу определения места судна решить, в принципе, невозможно. Синтез искаженных изолиний методами сплайн-интерполяции фактически не представляет реальной проблемы в рамках двух разработанных математических подходов.

Ключевые слова: В-сплайн, навигационная изоповерхность, генерируемая навигационная функция, «шапочная» функция, сеточный интервал, искаженная изолиния, дифференциальный режим.

Для цитирования:

Ююкин И. В. Сплайн-интерполяция навигационных изолиний / И. В. Ююкин // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2019. — Т. 11. — № 6. — С. 1026–1036. DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-6-1026-1036.

Введение (Introduction)

Для достижения быстродействия вычислительных операций и компактности хранения информации представляется актуальной интерполяция любых навигационных изолиний двумя различными сплайновыми методами. Для апробирования предлагаемого нового математического подхода к решению классических проблем навигации сформулированы следующие задачи:

1. Создание алгоритма интерполяции изолинии базисными финитными сплайнами с обеспечением конструктивного сжатия массивов данных навигационных параметров.
2. Разработка альтернативного высокоскоростного алгоритма классической сплайн-интерполяции навигационной изолинии.
3. Программная реализация для бортового компьютера сплайновых алгоритмов в двух исследуемых вариантах.

Сплайновую апробацию можно трактовать как усиление позиций обобщенного метода навигационных изолиний [1] с применением достижений современной математики.

Применение сплайновой интерполяции навигационных изолиний логичным образом согласуется с идеей отказа от общепринятого метода линий положения и непосредственного оперирования базовыми изолиниями в информационных технологиях судовождения [2]. Особую значимость в условиях современности предлагаемый подход приобретает в приложениях астронавигации при прямом аналитическом варианте расчета координат местоположения судна [3] на основе сплайнового восполнения круга равных высот с использованием вычислительных ресурсов бортового компьютера. При таком подходе отпадает необходимость выполнять графическую прокладку линий положения, до сих пор применяемую в практике судовождения [2]. Кроме того, в условиях реализации перспективной математики появляется реальная возможность продуктивно использовать автономность средств мореходной астрономии, что приобретает особую важность в случае блокирования доступа к глобальной спутниковой позиционной системе морским гражданскими потребителями в случае локальных военных конфликтов.

В настоящее время все еще существуют технические сложности получения спутниковых данных в некоторых районах Мирового океана, в такие моменты применение методов астронавигации остается единственной возможностью определить местоположение судна и поправку компаса в открытом море. Согласно проведенным экспериментам по исследованию навигационной обстановки в определенных районах, из-за перерывов в использовании спутниковых навигационных систем суммарное время отсутствия данных может составлять до 25–27 % от общего времени морского перехода [4]. В условиях современного дефицита времени на мостике становится

оправданным внимание к ускоренной обработке астрономических наблюдений перспективными методами сплайн-функций.

Навигационную изолинию можно интерпретировать как частный случай изоповерхности, так как изолинии графически являются контурными линиями уровня навигационной изоповерхности при рассмотрении конкретного проекционного сечения [5], [6]. Однако, если постановкой задачи обработки навигационной информации определено оперирование исключительно с изолиниями, то появляется целесообразность в разработке отдельных перспективных алгоритмов сплайн-интерполяции изолинии в 2D формате.

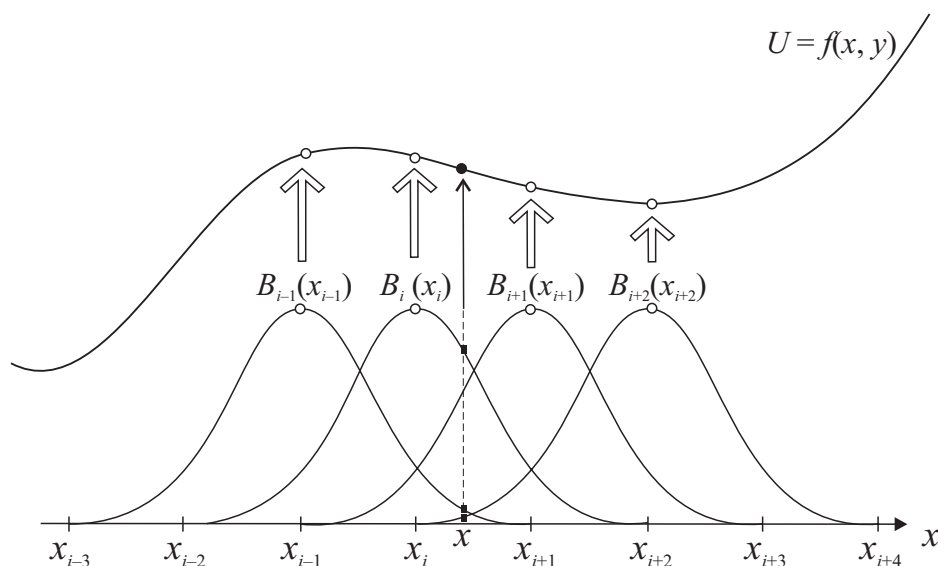
Методы и материалы (Methods and Materials)

В качестве методологической основы апробируется математический аппарат сплайн-функций. Под сплайном понимается кусочная функция, составленная из определенного числа многочленов невысокой степени и имеющая как минимум одну непрерывную производную. Термин «сплайн» в переводе с английского означает такой реальный физический объект, как гибкая линейка, т. е. приспособления, применяемого разметчиками плазов для оптимального проведения плавных кривых через фиксированные реперные точки. Благодаря упругости рейки и умелому манипулированию специальными грузами в опорных точках, получается плавная имитация оригинальной линии при минимизации полной свободной энергии упругой пластины [7].

В результате операции сплайнового приближения к исходной функции напряженная кривая оказывается математически «гладкой». Под математической гладкостью подразумевается успешность функциональной дифференцируемости [8]. Элементы многозвенника могут быть «склеены» между собой в узлах сетки до разной степени гладкости, начиная с того, что допускаются разрывы непрерывности до нескольких производных. Кусочные интерполяции являются наилучшим практическим средством приближения любой навигационной изолинии. В частности, сплайновые технологии самым эффективным образом используются для изучения геофизических данных [9].

Результаты (Results)

Навигационная функция $U = f(x, y)$ определяет математическую зависимость навигационных параметров в локальной системе координат для целей морской навигации. Интерполяция навигационной функции математически лучшим образом реализуется за счет умножения узловых значений базисных финитных значений $y_i = B_i(x)$ на расчетные скалярные сплайновые коэффициенты c_i в каждом узле сеточного интервала. Геометрическая интерпретация операции синтеза гипотетической навигационной функции методами базисных сплайнов показана на рисунке.



Геометрическая интерпретация интерполяции
гипотетической навигационной изолинии базисными сплайнами

На рисунке акцентировано внимание на технологической сущности процесса сплайн-интерполяции. Наглядно демонстрируется, что базисный сплайн и генерируемая функция $U = f(x, y)$ представляют собой разные физические объекты. B -сплайн организует базовую искусственную конструкцию, а не является непосредственно фактическим фрагментом кривой [5]. Реальная математическая кривая синтезируется путем умножения последовательности «шапочных» функций $B_i(x)$ на расчетные скалярные коэффициенты c_i как в каждой узловой точке, так и в любой промежуточной точке сеточного интервала. Таким образом, базисная финитная функция является вторичной по отношению к оригинальной навигационной функциональной зависимости. B -сплайн является математическим инструментарием для приближения навигационной функции.

Первоначально рассмотрим технологию интерполяции навигационной изолинии методом базисных сплайнов по первому варианту. Так как компоненты $B_i(x)$ финитны, то в каждом узле x_i от нуля отличны только активные элементы с номерами $i - 1, i, i + 1$. Следовательно, условия интерполяции навигационной функции приобретают вид

$$c_{i-1}B_{i-1}(x_i) + c_iB_i(x_i) + c_{i+1}B_{i+1}(x_i) = f_i, \quad i = 1, \dots, N. \quad (1)$$

Однако в этом случае система (1), составленная из N уравнений, имеет $N + 2$ неизвестных c_i , поэтому для ее замыкания следует добавить краевые условия по первой производной, математически задающие физическую напряженность сплайновой кривой:

$$\left. \begin{aligned} c_0B'_0(x_1) + c_1B'_1(x_1) + c_2B'_2(x_1) &= f'_1; \\ c_{i-1}B'_{i-1}(x_i) + c_iB'_i(x_i) + c_{i+1}B'_{i+1}(x_i) &= f'_i, \quad i = 1, \dots, N; \\ c_{N-1}B'_{N-1}(x_N) + c_NB'_N(x_N) + c_{N+1}B'_{N+1}(x_N) &= f'_N. \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

Используя краевые условия, исключаем c_0 и c_{N+1} из системы (2):

$$\begin{aligned} c_0 &= \frac{f'_1 - c_1B'_1(x_1) - c_2B'_2(x_1)}{B'_0(x_1)}; \\ c_{N+1} &= \frac{f'_N - c_{N-1}B'_{N-1}(x_N) - c_NB'_N(x_N)}{B'_{N+1}(x_N)}. \end{aligned} \quad (3)$$

Первое и последнее уравнения условий интерполяции приобретают вид:

$$\begin{aligned} c_0B_0(x_1) + c_1B_1(x_1) + c_2B_2(x_1) &= f_1; \\ c_{N-1}B_{N-1}(x_N) + c_NB_N(x_N) + c_{N+1}B_{N+1}(x_N) &= f_N. \end{aligned} \quad (4)$$

Подставим в уравнения (4) вместо коэффициентов c_0 и c_{N+1} их выражения через краевые условия (3):

$$\begin{aligned} \frac{(f'_1 - c_1B'_1(x_1) - c_2B'_2(x_1))B_0(x_1)}{B'_0(x_1)} + c_1B_1(x_1) + c_2B_2(x_1) &= f_1; \\ c_{N-1}B_{N-1}(x_N) + c_NB_N(x_N) + \frac{(f'_N - c_{N-1}B'_{N-1}(x_N) - c_NB'_N(x_N))B_{N+1}(x_N)}{B'_{N+1}(x_N)} &= f_N. \end{aligned} \quad (5)$$

С учетом уравнений (5) в модифицированном виде система (2) примет вид:

$$\left. \begin{aligned} c_1 \left[B_1(x_1) - \frac{B'_1(x_1)}{B'_0(x_1)} B_0(x_1) \right] + c_2 \left[B_2(x_1) - \frac{B'_2(x_1)}{B'_0(x_1)} B_0(x_1) \right] &= f_1 - \frac{f'_1(x_1)}{B'_0(x_1)} B_0(x_1); \\ c_{i-1}B_{i-1}(x_i) + c_iB_i(x_i) + c_{i+1}B_{i+1}(x_i) &= f_i, \quad i = 2, \dots, N-1; \\ c_{N-1} \left[B_{N-1}(x_N) - \frac{B'_{N-1}(x_N)}{B'_{N+1}(x_N)} B_{N+1}(x_N) \right] + c_N \left[B_N(x_N) - \frac{B'_N(x_N)}{B'_{N+1}(x_N)} B_{N+1}(x_N) \right] &= \\ &= f_N - \frac{f'_N}{B'_{N+1}(x_N)} B_{N+1}(x_N) \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

Матричная форма построения базисного интерполяционного сплайна формируется следующим образом:

$$\begin{bmatrix} L_1 & P_1 & 0 & K_1 \\ K_2 & L_2 & P_2 & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & K_{N-1} & L_{N-1} & P_{N-1} \\ P_N & 0 & K_N & L_N \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} c_1 \\ \dots \\ \dots \\ \dots \\ c_N \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_1^* \\ \dots \\ \dots \\ \dots \\ f_N^* \end{bmatrix}, \quad (7)$$

где $K_1 = 0$;

$$L_1 = B_1(x_1) - \frac{B'_1(x_1)}{B'_0(x_1)} B_0(x_1);$$

$$P_1 = B_2(x_1) - \frac{B'_2(x_1)}{B'_0(x_1)} B_0(x_1);$$

$$K_N = B_{N-1}(x_N) - \frac{B'_{N-1}(x_N)}{B'_{N+1}(x_N)} B_{N+1}(x_N);$$

$$L_N = B_N(x_N) - \frac{B'_N(x_N)}{B'_{N+1}(x_N)} B_{N+1}(x_N);$$

$$P_N = 0;$$

$$K_i = B_{i-1}(x_i);$$

$$L_i = B_i(x_i);$$

$$P_i = B_{i+1}(x_i);$$

$$f_1^* = f_1 - \frac{f'_1}{B'_0(x_1)} B_0(x_1);$$

$$f_N^* = f_N - \frac{f'_N}{B'_{N+1}(x_N)} B_{N+1}(x_N).$$

Вычисление скалярных коэффициентов кубических сплайнов (6) предполагает решение линейных алгебраических систем. Матрицы таких систем имеют трехдиагональную структуру [10], вследствие этого метод исключения Гаусса реализуется по более простым формулам так называемого *метода прогонки*. На первом этапе вычисляются по рекуррентным формулам коэффициенты V_i и W_i при $i = 1, \dots, N$:

$$\left. \begin{aligned} V_0 &= 0; \\ W_0 &= 0; \\ V_i &= -\frac{P_i}{L_i + K_i V_{i-1}}; \\ W_i &= \frac{f_i - K_i W_{i-1}}{L_i + K_i V_{i-1}}. \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

Далее непосредственно вычисляются в обратном порядке неизвестные c_i , начиная с коэффициента c_N :

$$c_i = V_i c_{N+1} + W_i, \quad (9)$$

где индекс i убывает от N до 1, а $c_{N+1} = 0$, так как $c_N = W_N$.

Найденные скалярные сплайновые коэффициенты c_i необходимы для умножения в каждом сеточном узле на базисные компоненты $B_i(x_i)$ с целью реализации непосредственно процедуры сплайн-интерполяции как таковой.

Генерирование навигационной функции в произвольной точке $x \in [x_i, x_{i+1}]$ сеточного интервала (см. рисунок с. 1028) осуществляется на основе базисной сплайновой композиции [5]:

$$S(x) = c_{i-1}B_{i-1}(x) + c_i B_i(x) + c_{i+1}B_{i+1}(x) + c_{i+2}B_{i+2}(x).$$

Классический полиномиальный кубический сплайн альтернативным методом по второму варианту на каждом сеточном отрезке представляет собой многочлен третьей степени, являясь фактической заменой навигационной изолинии в заданном коридоре точности на каждом сеточном промежутке:

$$S_i(x) = A_i + B_i(x - x_i) + C_i(x - x_i)^2 + D_i(x - x_i)^3; \quad i = 1, \dots, N; \quad x_i < x < x_{i+1}, \quad (10)$$

где A_i, B_i, C_i, D_i — неизвестные скалярные сплайновые коэффициенты, подлежащие математическому определению.

Смысл числовых сплайновых коэффициентов A_i, B_i, C_i, D_i прояснится в результате тройного дифференцирования (10):

$$\left. \begin{aligned} S'_i(x) &= B_i + 2C_i(x - x_i) + 3D_i(x - x_i)^2; \\ S''_i(x) &= 2C_i + 6D_i(x - x_i); \\ S'''_i(x) &= 6D_i. \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

Окончательная аналогия дифференцирования может быть представлена следующим образом:

$$\left. \begin{aligned} A_i &= S_i(x_i); \\ B_i &\approx S'_i(x_i); \\ C_i &\approx S''_i(x_i); \\ D_i &\approx S'''_i(x_i). \end{aligned} \right\}$$

Условия интерполирования определяют равенство навигационной функции соответствующему сплайновому коэффициенту в сеточных узлах:

$$A_i = f(x_i), \quad i = 1, \dots, N.$$

Требование непрерывности сплайн-функции $S(x)$ приводит к условиям: $S_i(x_i) = S_{i+1}(x_i)$, $i = 1, \dots, N - 1$. Учитывая выражения для $S_i(x)$, получим при $i = 1, \dots, N - 1$ уравнения вида:

$$A_i = A_{i+1} + B_{i+1}(x_i - x_{i+1}) + C_{i+1}(x_i - x_{i+1})^2 + D_{i+1}(x_i - x_{i+1})^3. \quad (12)$$

Обозначим шаг сетки $h_i = x_i - x_{i-1}$ и с учетом интервального шага перепишем уравнения (12) в новом виде:

$$\left. \begin{aligned} B_i h_i - C_i h_i^2 + D_i h_i^3 &= f_i - f_{i-1}, \quad i = 1, \dots, N; \\ B_{i+1}(x_i - x_{i+1}) &= -B_i(x_i - x_{i-1}); \\ C_{i+1}(x_i - x_{i+1}) &= -C_i(x_i - x_{i-1}); \\ D_{i+1}(x_i - x_{i+1}) &= -D_i(x_i - x_{i-1}). \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

Условия непрерывности первой производной $S'_i(x_i) = S'_{i+1}(x_i)$, $i = 1, \dots, N - 1$ приводят к уравнениям вида:

$$B_i = B_{i+1} + 2C_{i+1}(x_i - x_{i+1}) + 3D_{i+1}(x_i - x_{i+1})^2. \quad (14)$$

При шаге $h_i = x_i - x_{i-1}$ уравнение (14) примет вид:

$$2C_i h_i - 3D_i h_i^2 = B_i - B_{i-1}, \quad i = 1, \dots, N. \quad (15)$$

Из условий непрерывности второй производной $S_i''(x_i) = S_{i+1}''(x_i)$ получим уравнения:

$$C_i = C_{i+1} + 3D_{i+1}(x_i - x_{i+1}). \quad (16)$$

Перепишем уравнение (16) для шага $h_i = x_i - x_{i-1}$:

$$3D_i h_i = C_i - C_{i-1}, \quad i = 1, \dots, N. \quad (17)$$

Объединяя первое уравнение системы (13), а также уравнения (15) и (17), получим систему $3N - 2$ уравнений относительно $3N$ неизвестных $B_i, C_i, D_i, i = 1, \dots, N$:

$$\left. \begin{aligned} B_i h_i - C_i h_i^2 + D_i h_i^3 &= f_i - f_{i-1}; \\ 2C_i h_i - 3D_i h_i^2 &= B_i - B_{i-1}; \\ 3D_i h_i &= C_i - C_{i-1}. \end{aligned} \right\} \quad (18)$$

Два недостающих уравнения вводим, задавая граничные условия для $S(x)$. Тогда приходим к замкнутой системе уравнений для определения коэффициентов кубического сплайна. Исключим из системы (18) переменные B_i и D_i . Для этого рассмотрим разность двух уравнений вида (13):

$$\left. \begin{aligned} B_i h_i - C_i h_i^2 + D_i h_i^3 &= f_i - f_{i-1}; \\ B_{i-1} h_{i-1} - C_{i-1} h_{i-1}^2 + D_{i-1} h_{i-1}^3 &= f_{i-1} - f_{i-2}. \end{aligned} \right\} \quad (19)$$

Для упрощения алгебраической системы разделим первое уравнение (19) на h_i , а второе — на h_{i-1} :

$$\left. \begin{aligned} B_i - C_i h_i + D_i h_i^2 &= \frac{f_i - f_{i-1}}{h_i}; \\ B_{i-1} - C_{i-1} h_{i-1} + D_{i-1} h_{i-1}^2 &= \frac{f_{i-1} - f_{i-2}}{h_{i-1}}. \end{aligned} \right\} \quad (20)$$

В результате вычитания из первого уравнения (20) второго получим

$$B_i - B_{i-1} = (C_i h_i - C_{i-1} h_{i-1}) - (D_i h_i^2 - D_{i-1} h_{i-1}^2) + \frac{f_i - f_{i-1}}{h_i} - \frac{f_{i-1} - f_{i-2}}{h_{i-1}}. \quad (21)$$

Подставим в уравнение (21) вместо $B_i - B_{i-1}$ выражение (15):

$$2C_i h_i - 3D_i h_i^2 = C_i h_i - C_{i-1} h_{i-1} + D_i h_i^2 + D_{i-1} h_{i-1}^2 + \frac{f_i - f_{i-1}}{h_i} - \frac{f_{i-1} - f_{i-2}}{h_{i-1}}. \quad (22)$$

После приведения подобных элементов выражение (22) окончательно примет вид:

$$C_i h_i + C_{i-1} h_{i-1} - 2D_i h_i^2 - D_{i-1} h_{i-1}^2 = \frac{f_i - f_{i-1}}{h_i} - \frac{f_{i-1} - f_{i-2}}{h_{i-1}}. \quad (23)$$

Используя уравнение (17), находим:

$$\left. \begin{aligned} D_i h_i^2 &= \frac{(C_i - C_{i-1})h_i}{3}; \\ D_{i-1} h_{i-1}^2 &= \frac{(C_{i-1} - C_{i-2})h_{i-1}}{3}. \end{aligned} \right\} \quad (24)$$

Подставив выражения (24) в (23) получим:

$$C_i h_i + C_{i-1} h_{i-1} - \frac{2}{3}(C_i - C_{i-1})h_i - \frac{1}{3}(C_{i-1} - C_{i-2})h_{i-1} = \frac{f_i - f_{i-1}}{h_i} - \frac{f_{i-1} - f_{i-2}}{h_{i-1}}. \quad (25)$$

Умножив уравнение (25) на «три» и раскрыв скобки, получим

$$3C_i h_i + 3C_{i-1} h_{i-1} - 2C_i h_i + 2C_{i-1} h_i - C_{i-1} h_{i-1} + C_{i-2} h_{i-1} = 3 \left(\frac{f_i - f_{i-1}}{h_i} - \frac{f_{i-1} - f_{i-2}}{h_{i-1}} \right). \quad (26)$$

Приведение подобных элементов в выражении (26) позволит получить

$$C_i h_i + 2C_{i-1} (h_{i-1} + h_i) + C_{i-2} h_{i-1} = 3 \left(\frac{f_i - f_{i-1}}{h_i} - \frac{f_{i-1} - f_{i-2}}{h_{i-1}} \right). \quad (27)$$

Возвращаясь к шагу сетки $h_i = x_{i+1} - x_i$, преобразуем выражение (27) к окончательному виду:

$$C_{i+1} h_{i+1} + 2C_i (h_i + h_{i+1}) + C_{i-1} h_i = 3 \left(\frac{f_{i+1} - f_i}{h_{i+1}} - \frac{f_i - f_{i-1}}{h_i} \right), \quad i = 1, \dots, N-1. \quad (28)$$

Решение трехдиагональной матрицы системы находится методом прогонки. По найденным коэффициентам C_i определяются коэффициенты B_i и D_i с помощью системы уравнений (18):

$$\left. \begin{aligned} D_i &= \frac{C_i - C_{i-1}}{3h_i}; \\ B_i &= C_i h_i - D_i h_i^2 + \frac{f_i - f_{i-1}}{h_i}. \end{aligned} \right\} \quad (29)$$

Сплайновая альтернатива обеспечивает высокоскоростной расчет любой навигационной изолинии за счет логической оптимизации вычислительной структуры полиномиальной сплайн-интерполяции в сравнении с применением базисных финитных сплайнов.

Обсуждение (Discussion)

Представляется целесообразным провести анализ оптимальности конфигурирования B -сплайнов на определённом типе носителей. Существует возможность построить систему базисных функций различными путями. Можно, например, умножить $B_i(x_i)$ на множители и получить альтернативную систему. Тогда, правда, «шапочные» функции [11] утратят свойство нормализованности, т. е. алгоритмической возможности разбиения численной единицы на составляющие для базисного сплайна [5]. Можно построить финитные функции и с другим носителем, содержащим не четыре интервала, как в разработанном автором статьи алгоритме [5], а, например, пять или более [12], а вот уменьшить носитель не удастся [13]. В этом можно убедиться, если выполнить подсчет коэффициентов и условий, налагаемых на элемент $B_i(x_i)$. В случае носителя, состоящего из трех интервалов, число коэффициентов равно числу условий, и решением служит сплайн, тождественно равный нулю [14]. При двух сеточных интервалах задача переопределена, т. е. коэффициентов меньше, чем условий, и также имеет место лишь нулевое решение [15]. Таким образом, задача искусственного моделирования кривых линий [16] решится наилучшим образом, если применяемые базисные функции образуются на минимальных возможных сеточных носителях.

Представляется нецелесообразным механическое увеличение маркерных носителей сплайна [17], что привело бы к неизбежному увеличению числа диагоналей в интерполяционной матрице, а это, разумеется, является невыгодным в вычислительном смысле. В результате данного проведенного специального исследования оптимальности носителя B -сплайна конечный выбор сделан на построении кубических финитных функций на четырех сеточных интервалах [5]. Традиционные сплайны показали эффективность по быстродействию при интерполяции навигационных изолиний, но уступают базисным сплайнам по компактности хранения информации и вычислительным особенностям базисных сплайн-функций при синтезе навигационной изоповерхности [6].

Расчет на базе классических полиномиальных сплайнов по результатам специально организованных вычислительных экспериментов дает результат увеличения быстродействия не менее 30 % по сравнению со стандартными решениями, что практически обеспечивает возможность выполнения навигационных вычислений в масштабе реального времени. Время работы

программно-реализованных алгоритмов замерялось в тысячных долях секунды с заикливанием на 100000 при решении одинаковых тестовых примеров.

В случае восстановления навигационной изоповерхности на первый план выступают преимущества нетрадиционных для математических основ судовождения базисных сплайнов по фактору алгоритмической возможности экономии оперативной памяти бортового компьютера. Из-за конструктивной особенности базисной структуры *B*-сплайна, объем хранимой навигационной информации сокращается в 4 раза по сравнению с алгоритмом классической полиномиальной сплайн-интерполяции [5].

Выводы (Summary)

Проведенное в работе исследование позволяет сделать следующие выводы:

1. Для создания прогрессивных алгоритмов интерполяции навигационной функции в долгосрочной перспективе следует отдать предпочтение эффективной декомпозиции вычислительной процедуры на основе *B*-сплайнов.
2. На основе разработанного методического и алгоритмического обеспечения автоматизации интерполяции навигационной функции любой степени сложности составлены две паскаль-программы, обеспечивающие высокую точность [5] и устойчивость вычислительных процедур. В качестве прикладного программного обеспечения для бортового компьютера апробируется метод на основе базисных финитных сплайнов и полиномиальной сплайн-интерполяции.
3. Разработанные алгоритмы позволяют напрямую использовать сетку искаженных поправками изолиний при широко используемом в современном судовождении дифференциальном режиме в различных его вариантах. Исканная изолиния имеет сложную математическую формализацию, и традиционным путем навигационную задачу решить в этом случае невозможно. Синтез искаженных изолиний методами сплайн-интерполяции не представляет реальной математической проблемы с позиций аппарата кусочных интерполяций.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Вульфович Б. А. Основы общей теории навигационных изолиний: автореф. дис. ... д-ра техн. наук / Б. А. Вульфович. — Л., 1975. — 43 с.
2. Вульфович Б. А. К вопросу о применении современных информационных технологий при астронавигационном определении места судна / Б. А. Вульфович, В. А. Фогилев // Вестник Мурманского государственного технического университета. — 2008. — Т. 11. — № 3. — С. 446–450.
3. Vulfovich B. New Ideas for Celestial Navigation in the Third Millennium/ B. Vulfovich, V. Fogilev // The Journal of Navigation. — 2010. — Vol. 63. — Is. 2. — Pp. 373–378. DOI: 10.1017/S0373463309990348.
4. Фогилев В. А. Аналитические методы обработки и точность астронавигационных обсерваций: автореф. дис. ... канд. техн. наук / В. А. Фогилев. — СПб., 2012. — 25 с.
5. Ююкин И. В. Оптимизация моделирования навигационной изоповерхности методами базисных финитных сплайнов / И. В. Ююкин // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2019. — Т. 11. — № 2. — С. 266–274. DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-2-266-274.
6. Ююкин И. В. Модификация метода наименьших квадратов для сплайн-аппроксимации навигационной изоповерхности / И. В. Ююкин // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2019. — Т. 11. — № 4. — С. 631–639. DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-4-631-639.
7. Volkov Y. S. Fifty years of Schoenberg's problem on the convergence of spline interpolation / Y. S. Volkov, Y. N. Subbotin // Proceedings of the Steklov Institute of Mathematics. — 2015. — Vol. 288. — Is. 1. — Pp. 222–237. DOI: 10.1134/S0081543815020236.
8. Dmitriev V. I. The Regularized Spline (R-Spline) Method for Function Approximation / V. I. Dmitriev, J. G. Ingtem // Computational Mathematics and Modeling. — 2019. — Vol. 30. — Is. 3. — Pp. 198–206. DOI: 10.1007/s10598-019-09447-w.
9. Mariani M. C. Spline interpolation techniques applied to the study of geophysical data / M. C. Mariani, K. Basu // Physica A: Statistical Mechanics and its Applications. — 2015. — Vol. 428. — Pp. 68–79. DOI: 10.1016/j.physa.2015.02.014.

10. Volkov Y. S. The General Problem of Polynomial Spline Interpolation / Y. S. Volkov // *Proceedings of the Steklov Institute of Mathematics*.—2018.—Vol.300.—Suppl.1.—Pp. 187–198. DOI: 10.1134/S0081543818020190.
11. Shevaldin V. T. Calibration relations for analogues of the basis splines with uniform nodes / V. T. Shevaldin // *Ural Mathematical Journal*. —2017. —Vol. 3. —Is. 1. —Pp. 76–80. DOI: 10.15826/umj.2017.1.006.
12. Субботин Ю. Н. Об одном методе построения локальных параболических сплайнов с дополнительными узлами / Ю. Н. Субботин, В. Т. Шевалдин // *Труды института математики и механики УрО РАН*. — 2019. — Т. 25 — № 2. — С. 205–219. DOI: 10.21538/0134-4889-2019-25-2-205-219.
13. Шевалдин В. Т. Алгоритмы построения локальных экспоненциальных сплайнов третьего порядка с равноотстоящими узлами / В. Т. Шевалдин // *Труды института математики и механики УрО РАН*. — 2019. — Т. 25 — № 3. — С. 279–287. DOI: 10.21538/0134-4889-2019-25-3-279-287.
14. Shevaldin V. T. A Method for the Construction of Wavelet Analogs by Means of Trigonometric B-Splines / V. T. Shevaldin // *Proceedings of the Steklov Institute of Mathematics*. — 2018. — Vol. 300. — Suppl. 1. — Pp. 165–171. DOI: 10.1134/S0081543818020165.
15. Jiwari R. A class of numerical algorithms based on cubic trigonometric B-spline functions for numerical simulation of nonlinear parabolic problems / R. Jiwari, S. Pandit, M. E. Koksai // *Computational and Applied Mathematics*. — 2019. — Vol. 38. — Is. 3.—Pp. 140. DOI: 10.1007/s40314-019-0918-1.
16. Subbotin Y. N. Uniform approximation of curvature of smooth planar curves / Y. N. Subbotin, S. A. Telyakovskii // *Proceedings of the Steklov Institute of Mathematics*. — 2018. — Vol. 300. — Suppl. 1. — Pp. 184–186. DOI: 10.1134/S0081543818020189.
17. Гатилов С. Ю. Локальный анализ задач и пересечения кривых и поверхностей методом трассировки / С. Ю. Гатилов // *Сибирский журнал чистой и прикладной математики*. — 2016. — Т. 16. — № 1. — С. 57–89. DOI: 10.17377/PAM.2016.16.105.

REFERENCES

1. Vulfovich, Boris A. *Osnovy obshey teoriinavigatsionnykhizoliniy*. Abstract of Dr. Diss. L., 1975.
2. Vulfovich, Boris A., and V. A. Fogilev. “On application of modern computer technologies for celestial fixes.” *Vestnik Murmanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* 11.3(2008): 446–450.
3. Vulfovich, Boris, and Vasily Fogilev. “New ideas for celestial navigation in the third millennium.” *The Journal of Navigation* 63.2 (2010): 373–378. DOI:10.1017/S0373463309990348.
4. Fogilev, Vasily A. *Analiticheskie metody obrabotki i tochnost' astronavigatsionnykh observatsiy*. Abstract of PhD diss. SPb, 2012.
5. Yuyukin, Igor V. “Optimization of navigational isosurface simulation by the methods of basic finite splines.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 11.2 (2019): 266–274. DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-2-266-274.
6. Yuyukin, Igor V. “Modification of the least squares method for splineapproximation of navigational isosurface.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova* 11.4 (2019): 631–639. DOI:10.21821/2309-5180-2019-11-4-631-639.
7. Volkov, Yuriy S., and Yuriy N. Subbotin. “Fifty years of Schoenberg’s problem on the convergence of spline interpolation.” *Proceedings of the Steklov Institute of Mathematics* 288.1 (2015): 222–237. DOI: 10.1134/S0081543815020236.
8. Dmitriev, Vladimir I., and Jennie G. Ingtem. “The Regularized Spline (R-Spline) Method for Function Approximation.” *Computational Mathematics and Modeling* 30.3 (2019): 198–206. DOI: 10.1007/s10598-019-09447-w.
9. Mariani, Maria C., and Kanadpriya Basu. “Spline interpolation techniques applied to the study of geophysical data.” *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications* 428 (2015): 68–79. DOI: 10.1016/j.physa.2015.02.014.
10. Volkov, Yuriy S. “The General Problem of Polynomial SplineInterpolation.” *Proceedings of the Steklov Institute of Mathematics* 300.1 (2018): 187–198. DOI: 10.1134/S0081543818020190.
11. Shevaldin, Valerii Trifonovich. “Calibration relations for analogues of the basis splines with uniform nodes” *Ural Mathematical Journal* 3.1 (2017): 76–80. DOI:10.15826/umj.2017.1.006.
12. Subbotin, Yuriy N., and Valerii T. Shevaldin. “A method of construction of local parabolic splines with additional knots.” *Proceedings of the Steklov Institute of Mathematics* 25.2(2019): 205–219. DOI: 10.21538/0134-4889-2019-25-2-205-219.

13. Shevaldin, Valerii T. "Algorithms for the construction third-order local exponential splines with equidistant knots." *Proceedings of the Steklov Institute of Mathematics* 25.3 (2019): 279–287. DOI: 10.21538/0134-4889-2019-25-3-279-287.
14. Shevaldin, Valerii T. "A Method for the Construction of Wavelet Analogs by Means of Trigonometric B-Splines." *Proceedings of the Steklov Institute of Mathematics* 300.1 (2018): 165–171. DOI: 10.1134/S0081543818020165.
15. Jiware, Ram, Sapna Pandit, and Mehmet Emir Koksall. "A class of numerical algorithms based on cubic trigonometric B-spline functions for numerical simulation of nonlinear parabolic problems." *Computational and Applied Mathematics* 38.3 (2019): 140. DOI: 10.1007/s40314-019-0918-1.
16. Subbotin, Yuriy N., and Sergei A. Telyakovskii. "Uniform approximation of curvature of smooth planar curves." *Proceedings of the Steklov Institute of Mathematics* 300.1 (2018): 184–186. DOI: 10.1134/S0081543818020189.
17. Gatilov, Stepan Yu. "Local analysis of curves and surfaces intersection problem using tracing." *Siberian Journal of Pure and Applied Mathematics* 16.1 (2016): 57–89. DOI: 10.17377/PAM.2016.16.105.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Ююкин Игорь Викторович —
 кандидат технических наук, доцент
 ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала
 С. О. Макарова»
 198035, Российская Федерация, г. Санкт-Петербург,
 ул. Двинская, 5/7
 e-mail: enigma_777@mail.ru, kaf_nav@gumrf.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Yuyukin, Igor V. —
 PhD, associate professor
 Admiral Makarov State University of Maritime
 and Inland Shipping
 5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg, 198035,
 Russian Federation
 e-mail: enigma_777@mail.ru, kaf_nav@gumrf.ru

Статья поступила в редакцию 10 октября 2019 г.

Received: October 10, 2019.

DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-6-1037-1043

ADVANTAGES OF INTRODUCING NEW MEANS OF CONSOLIDATING GROUPAGE CARGOES INTO CONTAINER TRANSPORTATION

O. A. Izotov

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

Possibilities of container technologies application to small consignments transportation as expansion of service sector of clients of transport services are considered. The most complete use of the technical and economic features of the transport types involved in the provision of services, their transport infrastructure and technologies for handling containers of different loading capacities, is the determining objective factor of the competitiveness sphere of transport organizations. The mechanism of advantages loss of container transportation by rollers of small consignments is revealed and issues of such cargoes integration in container transport and technological systems of large transshipment terminals and terminal centers of consolidation and distribution of cargo flow are considered. As a reserve for further development of container technologies, the component of container shipments from the warehouse areas of the sea container terminal by rail, the formation of accelerated container trains, container handling at pre-port and rear stations, which in the future determine the dynamics of container traffic in the inland transport complex of the country, are considered. At the same time, the use of new means of consolidation on the internal main routes of communications, as well as on the territory of the sea container terminal, will be able to rely on the transport infrastructure and technology of handling containers of different loading capacities that have developed in the regions. Intra-container placement of modules with consignments will allow owners of small shipments to gain access to transport and logistics systems for delivering goods based on the container technologies, and the end centers of consolidation and distribution to ensure the connection of their customers with international transport corridors. Typical container railway stations, focused on the processing the low-tonnage containers, in the future will be able to get direct access to the hinterland of the sea container terminal, eliminating additional cargo transshipment during their transfer from one type of transport to another one.

Keywords: container transport, means of cargo consolidation, freight forwarding, transport, groupage cargo.

For citation:

Izotov, Oleg A. "Advantages of introducing new means of consolidating groupage cargoes into container transportation." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 11.6 (2019): 1037–1043. DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-6-1037-1043.

УДК 656

ПРЕИМУЩЕСТВА ВНЕДРЕНИЯ НОВЫХ СРЕДСТВ УКРУПНЕНИЯ СБОРНЫХ ГРУЗОВ В КОНТЕЙНЕРНЫЕ ПЕРЕВОЗКИ

О. А. Изотов

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

Рассмотрены возможности использования контейнерных технологий применительно к перевозкам малых партий грузов как расширения сферы обслуживания клиентов транспортных услуг. Наиболее полное использование технико-экономических особенностей привлекаемых к перевозке при оказании услуг видов транспорта, их транспортной инфраструктуры и технологий обработки контейнеров различной грузоподъемности является определяющим объективным фактором сферы конкурентоспособности транспортных организаций. Выявлен механизм потери преимуществ контейнерных перевозок вальсами малых партий грузов и рассмотрены вопросы интеграции таких грузов в контейнерные транспортно-технологические системы крупных перегрузочных терминалов и концевых центров консолидации и распределения грузопотока. В качестве резерва дальнейшего развития контейнерных технологий рассмотрен компонент отправок контейнеров со складских площадей морского контейнерного терминала

железнодорожным транспортом, формирование ускоренных контейнерных поездов, обработка контейнеров на предпортовых и тыловых станциях, которые в перспективе и определяют динамику развития контейнерных сообщений во внутриматериковом транспортном комплексе страны. При этом применение новых средств укрупнения на внутренних магистральных путях сообщений, так же как и на территории морского контейнерного терминала, может быть основано на сложившейся в регионах транспортной инфраструктуре и технологии обработки контейнеров различной грузоподъемности. Внутриконтрейнерное размещение модулей с партиями грузов позволит владельцам малых отправок получить доступ к транспортно-логистическим системам доставки товаров на основе контейнерных технологий, а концевым центрам консолидации и распределения обеспечить стыковку своих клиентов с международными транспортными коридорами. Типовые контейнерные железнодорожные станции, ориентированные на обработку малотоннажных контейнеров, в перспективе смогут получить прямой, исключая дополнительные перегрузки грузов при их передаче с одного вида транспорта на другой, доступ к хинтерланду морского контейнерного терминала.

Ключевые слова: контейнерные перевозки, средства укрупнения грузов, экспедирование перевозок, сборные грузы.

Для цитирования:

Изотов О. А. Преимущества внедрения новых средств укрупнения сборных грузов в контейнерные перевозки / О. А. Изотов // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2019. — Т. 11. — № 6. — С. 1037–1043. DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-6-1037-1043.

Введение (Introduction)

Планирование на перспективу является неотъемлемой частью деятельности современной транспортно-экспедиторской компании, работающей в конкурентной среде. В борьбе за клиента на рынке транспортных услуг можно выбрать следующие направления:

1. Изыскание средств на финансирование новых проектов компании в целях укрепления ее позиций на рынке транспортных услуг.

2. Консолидация усилий всех участников транспортного процесса в целях повышения ценности услуг транспортного узла (морского контейнерного терминала, сухого порта, тылового терминала, регионального центра консолидации и распределения грузов) в целом [1].

При реализации первого направления строятся новые перегрузочные и складские комплексы, разрабатываются новые технологии продвижения контейнерных грузов вглубь материков. Реализация второго направления требует привлечения к организации работы транспортного узла в той или иной форме всех участников транспортного процесса начиная с судоходной линии и заканчивая грузовладельцами. На его основе оптимизируются рабочие процессы, сокращается документооборот, обеспечивается контроль доставки грузов до получателя и т. д.

Оба направления имеют целью расширение сферы транспортных услуг и снижение стоимости перевозок. Изучением этих вопросов специалисты занимаются уже более 40 лет. Вместе с тем наибольшую трудность для экспедитора на современном этапе развития конкуренции представляет включение в контейнерную транспортно-технологическую систему не массовых, а малых партий грузов, поступающих из глубины хинтреланда [2]. Это происходит ввиду вытеснения крупнотоннажными контейнерами малотоннажных контейнеров с рынка международных перевозок. Существует необходимость разработки нового средства укрупнения интегрирующего сборные партии грузов с контейнерными технологиями и поскольку эти вопросы оставались вне границ ранее проведенных исследований, определению роли новых средств укрупнения в транспортировке контейнерных грузов и посвящена эта работа.

Методы и материалы (Methods and Materials)

Вопросы снижения стоимости перевозок судоходная контейнерная линия решает вводом в эксплуатацию судов все большей вместимости, достигая эффекта масштабной экономии, что нашло свое отражение в рационализации глобальной системы морских маршрутов. Очевидно, что обслуживание столь значительного объема трафика требует от морских транспортных узлов

внедрения все новых инновационных технологий. Данное обстоятельство связано с тем, что стивидорные компании своим основным конкурентным преимуществом считают скорость обработки грузов [3]. На долю экспедиторских компаний приходится усиление координации деятельности всех видов транспорта, привлекаемых к продвижению контейнерных грузов до получателя и работа по снижению рисков, связанных с оказанием сопутствующих транспортных услуг [4]–[6]. Таким образом, в конкурентной деятельности экспедитора можно выделить два основных способа конкуренции:

1. *Ценовая конкуренция*, направленная на повышение прибыли, например, в ходе внедрения принципиально новых на местном рынке транспортных услуг, расширения границ оказания освоенных ранее услуг и т. п.

2. *Неценовая конкуренция*, предполагающая внедрение не связанных на прямую с перевозками дополнительных услуг. При этом повышается качества услуг, например, за счет развития складского сервиса, ускорения перегрузочных операций и т. п. [7].

Речь идет о «чистой» конкуренции между экспедиторскими компаниями за привлечение грузовладельца путем оказания новых, не свойственных остальным компаниям услуг. В конечном итоге, конкуренция выступает в роли инструментария повышения уровня обслуживания клиентуры транспорта, направленного на совершенствование технологического взаимодействия между объектами транспорта в случае необходимости перегрузки грузов, организации перевозки в смешанном сообщении, когда перевозка невозможна без участия нескольких видов транспорта. В целях конкурентоспособности транспортные организации стремятся к наиболее полному использованию технико-экономических показателей, привлекаемых к перевозке транспортных средств, перегрузочных терминалов, складских зон и т. д.

Каждый вид транспорта имеет свои логистические преимущества в цепочке продвижения товаров, которые делают его более конкурентоспособным перед другими. Так, при необходимости перевозки грузов широкой номенклатуры с территории морского порта вглубь материка автомобильный транспорт может оказаться единственным перевозчиком. Железнодорожный транспорт, в силу географического расположения его объектов, при постройке более ориентирован на перевозку массовых и тяжеловесных грузов, а с ростом потребности в контейнерных перевозках обратил свое внимание и на перевозку грузов в контейнерах, когда выгрузка груза из контейнера на смежные виды транспорта на морском терминале невозможна или экономически нецелесообразна. В этом случае контейнер с грузом следует до регионального центра на расстояние, обеспечивающее своевременное возвращение контейнера на морской терминал в течение отпущенных судоходной компанией свободных дней пользования таким контейнером (рис. 1, а). Далее груз принимается автотранспортом и следует до пункта назначения грузополучателя [8]. На этом этапе и происходит потеря грузовладельцем преимуществ организации контейнерных перевозок. Грузы в региональных центрах (железнодорожных станциях) перегружаются в виде тарно-штучных изделий, т. е. далее следуют без герметичной упаковки и не под пломбой.

В силу того, что вопросы организации отправок контейнеров с территории морского контейнерного терминала железнодорожным транспортом, формирования ускоренных контейнерных поездов и обработки контейнеров на предпортовых и тыловых станциях, в конечном итоге, определяют динамику развития контейнерных сообщений в материковой части транспортной системы страны, именно здесь находится резерв дальнейшего совершенствования контейнерных технологий.

В целях дальнейшей интеграции технических, технологических и вспомогательных операций, осуществляемых при контейнерных перевозках сборных грузов, к внедрению предлагается новое средство укрупнения [9]. Складной внутриконтейнерный модуль грузоподъемностью 5–10 т, способен:

- заменить вышедшие из употребления в России трех, пяти и десятитонные контейнеры;
- обеспечить отправку малой партии грузов в международном сообщении со всеми преимуществами контейнерных технологий;

– увеличить плечо завоза контейнерных грузов вглубь материка грузовладельца без задержки контейнеров судоходной линии;

– снизить трудоемкость перегрузочных операций, связанных с затаркой / растаркой контейнеров на морском терминале и т. д. [10]

Снижение грузоподъемности модуля по сравнению с крупнотоннажным контейнером, в котором модуль следует морским и железнодорожным транспортом, существенно расширит количество станций, пригодных к их переработке, а принадлежность модулей экспедиторским компаниям снизит их зависимость от необходимости своевременного возврата контейнеров, что, в свою очередь, позволит расширить зоны обслуживания клиентов с применением контейнерных технологий (рис. 1, б).

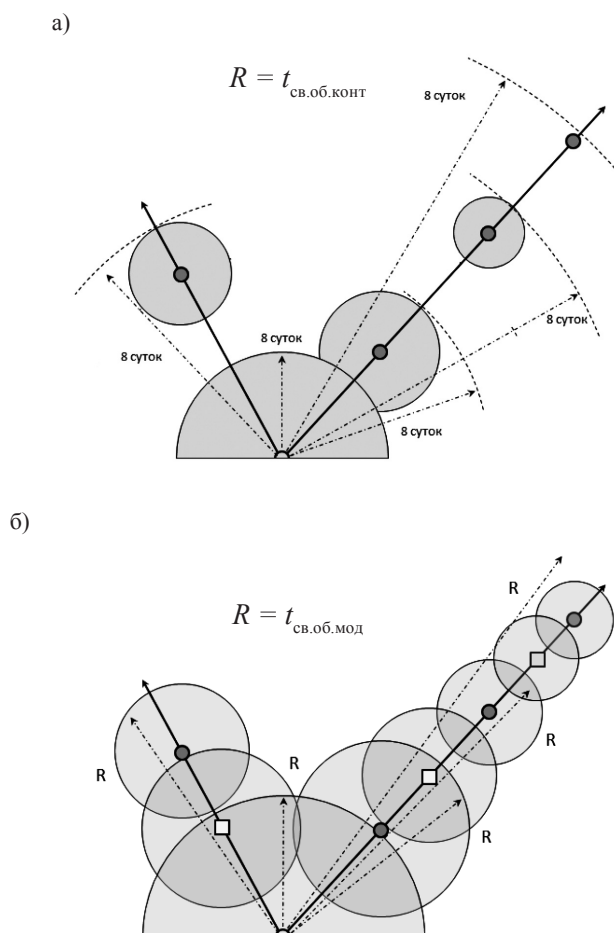


Рис. 1. Покрываемость зон завоза контейнерных грузов железнодорожным и автомобильным транспортом без растаривания контейнера (модуля):

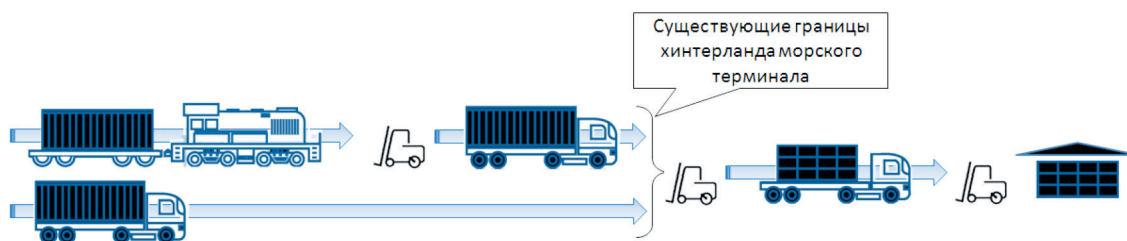
а — при доставке крупнотоннажных контейнеров за период свободного оборота контейнера ($t_{св.об.конт}$);
б — при доставке новых средств укрупнения сборных грузов за период свободного оборота модуля ($t_{св.об.мод}$).

Условные обозначения:

- — железнодорожные станции, принимающие 5- и 10-тонные контейнеры;
- — железнодорожные станции, принимающие крупнотоннажные контейнеры

Кроме того, выгрузка модулей из линейных контейнеров сократит количество перегрузочных операций, связанных с растаркой / затаркой контейнеров сборными грузами (рис. 2). Несмотря на то, что сами по себе перевозки грузов в контейнерах являются формой оптимизации транспортного процесса, внедрение новых средств укрупнения сборных грузов может выявить как новые направления совершенствования контейнерных технологий, так и возможность расширения применения уже существующих (рис. 3).

а)



б)



Рис. 2. Перевозка сборных грузов в контейнерах:
а — существующая транспортно-технологическая схема;
б — применение новых средств укрупнения

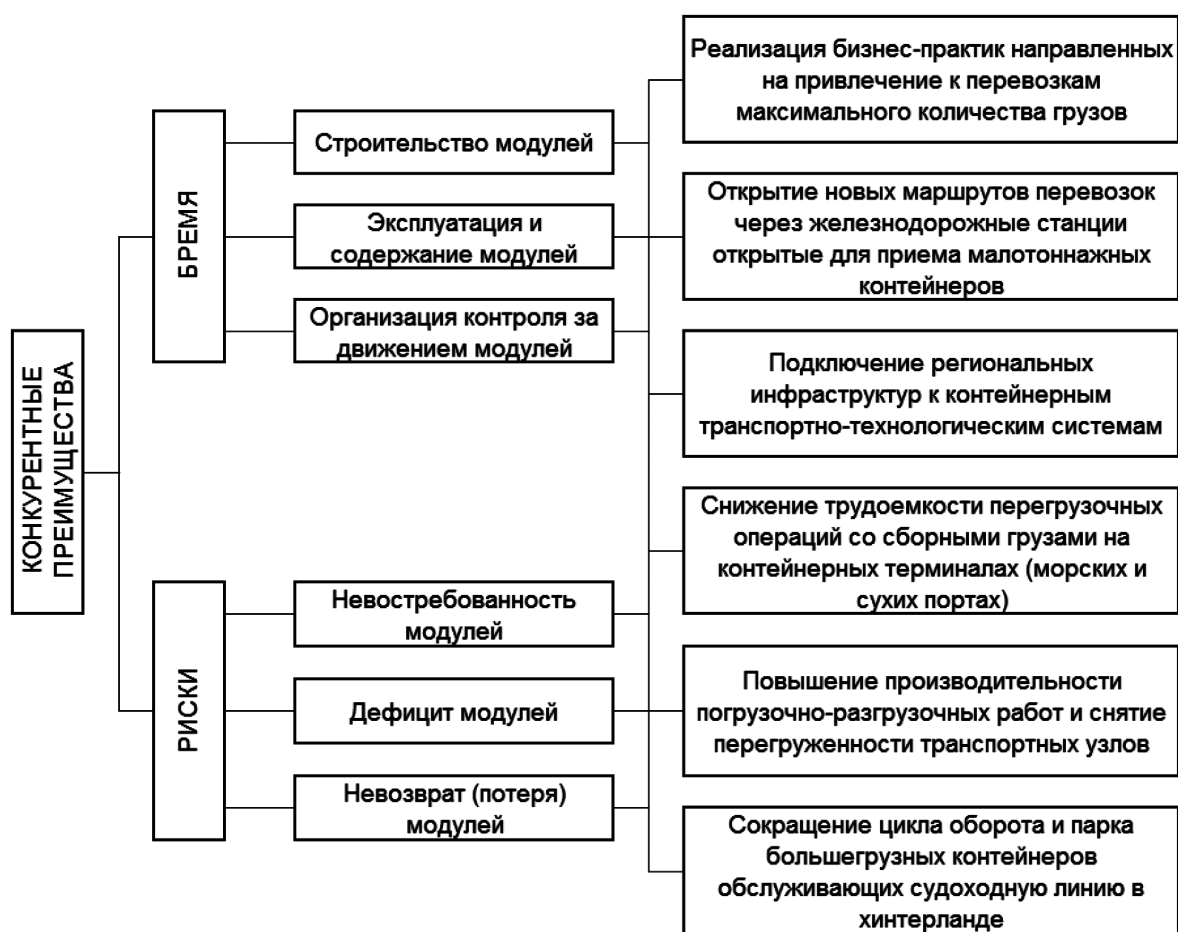


Рис. 3. Конкурентные преимущества экспедиторской компании от внедрения новых средств укрупнения сборных грузов

Любая инновация требует инвестиций, но в данном случае система применения новых средств укрупнения будет опираться на сложившуюся в регионах транспортную инфраструктуру и технологию обработки контейнеров различной грузоподъемности, что не потребует дополнительных затрат на приобретение нового перегрузочного оборудования и средств транспортировки, расширения складских зон и контейнерных площадок.

Заключение (Conclusion)

Развитие контейнерных перевозок повысило качество и надежность транспортного процесса на международных транспортных линиях, но вместе с тем безусловные преимущества контейнерных технологий, такие как сохранность, ускорение доставки грузов, снижение затрат на упаковочные материалы, уменьшение занятости рабочих на трудоемких операциях, связанных с перегрузкой генеральных грузов, нашли применение только в границах хинтерланда морских контейнерных терминалов. В то же время, по оценкам специалистов, на внутренних перевозках контейнеры теряют до 80 % своего эксплуатационного времени на грузовых площадках регионов в ожидании спроса на услуги [11]. Отчасти это происходит ввиду того, что с рынка контейнерных перевозок исчезли трех и пятитонные контейнеры, а использование только 20-футовых контейнеров исключает подбор контейнера по транспортной характеристике грузов. И поскольку контейнер приносит тем большую прибыль, чем лучше он наполнен и быстрее движется, внедрение новых средств укрупнения сборных грузов может оказаться связующим звеном между современными контейнерными технологиями и грузовладельцами малой партии груза.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Дмитриев А. А.* Модели совершенствования работы морских портов / А. А. Дмитриев, Я. Я. Эглит. — СПб.: Скиф, 2019. — 219 с.
2. *Кузнецов А. Л.* Методы мягких вычислений для генерации неоднородных потоков событий в моделировании транспортных систем / А. Л. Кузнецов [и др.] // Морские интеллектуальные технологии. — 2018. — № 4-4 (42). — С. 186–190.
3. *Кузнецов А. Л.* Моделирование развития портов / А. Л. Кузнецов, А. В. Галин // Морские интеллектуальные технологии. — 2018. — Т. 1. — № 3 (41). — С. 176–182.
4. *Изотов О. А.* Определение требуемого количества технологических ресурсов портов и грузовых терминалов методом имитационного моделирования / О. А. Изотов, А. В. Гуляев // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С.О. Макарова. — 2018. — Т. 10. — № 4. — С. 679–686. DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-4-679-686.
5. *Schepler X.* Global planning in a multi-terminal and multi-modal maritime container port / X. Schepler, S. Balev, S. Michel, É. Sanlaville // Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review. — 2017. — Vol. 100. — Pp. 38–62. DOI: 10.1016/j.tre.2016.12.002.
6. *Irannezhad E.* A joint hybrid model of the choices of container terminals and of dwell time / E. Irannezhad, C. Prato, M. Hickman // Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review. — 2017. — Vol. 121. — Pp. 119–133. DOI: 10.1016/j.tre.2017.12.005.
7. *Иванова М. Б.* Снижение неопределенности характеристик рынка при стратегическом планировании в транспортно-экспедиторской компании / М.Б. Иванова // Журнал университета водных коммуникаций. — 2011. — № 4. — С. 207а–215.
8. *Кузнецов А. Л.* Эволюция показателей, характеризующих эксплуатационную работу портов и терминалов / А. Л. Кузнецов, А. В. Кириченко, В. Н. Щербакова-Слюсаренко // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С.О. Макарова. — 2017. — Т. 9. — № 5. — С. 909–924. DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-5-909-924.
9. *Изотов О. А.* Технологические решения для организации отправок сборных грузов посредством контейнерных транспортно-технологических систем / О. А. Изотов, А. В. Кириченко, А. Л. Кузнецов // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2019. — Т. 11. — № 4. — С. 609–620. DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-4-609-620.

10. Изотов О. А. Перспективы экспедирования морских контейнерных перевозок / О. А. Изотов, А. Л. Кузнецов, А. В. Гуляев // Транспортное дело России. — 2019. — № 4. — С. 130–133.
11. Ботнарюк М. В. Анализ влияния рыночной ситуации на выбор конкурентной стратегии морского транспортного узла / М. В. Ботнарюк // Журнал Университета водных коммуникаций. — 2010. — № 1. — С. 79–86.

REFERENCES

1. Dmitriev, A. A., and Ya. Ya. Eglit. *Modeli sovershenstvovaniya raboty morskikh portov*. SPb.: Skif, 2019.
2. Kuznetsov, Alexander L., Oleg A. Isotov, Anton D. Semenov, and Sergey V. Smolencev. "Application of soft computing for generation of heterogeneous events flow in transport system modeling." *Marine Intellectual Technology* 4-4(42) (2018): 186–190.
3. Kuznetsov, Alexander L., and Alexander V. Galin. "Port development simulation." *Marine Intellectual Technology* 1.3(41) (2018): 176–182.
4. Izotov, Oleg A., and Alexander V. Gulyaev. "Determination of the required quantity of technological resources of ports and cargo terminals by the method of imitation modeling." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 10.4 (2018): 679–686. DOI: 10.21821/2309- 5180-2018-10-4-679-686.
5. Schepler, Xavier, Stefan Balev, Sophie Michel, and Éric Sanlaville. "Global planning in a multi-terminal and multi-modal maritime container port." *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review* 100 (2017): 38–62. DOI: 10.1016/j.tre.2016.12.002.
6. Irannezhad, Elnaz, Carlo Prato, and Mark Hickman. "A joint hybrid model of the choices of container terminals and of dwell time." *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review* 121 (2017): 119–133. DOI: 10.1016/j.tre.2017.12.005.
7. Ivanova, M. B. "Reducing of unknown of marketing index in the process of strategic planning in forwarding company." *Zhurnal universiteta vodnykh kommunikatsii* 4 (2011): 207a–215.
8. Kuznetsov, Aleksandr L., Aleksandr V. Kirichenko, and Victoria N. Shcherbakova-Slyusarenko. "The evolution of indicators describing the operation of ports and terminal." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova* 9.5 (2017): 909–924. DOI: 10.21821/2309- 5180-2017-9-5-909-924.
9. Izotov, Oleg A., Aleksandr V. Kirichenko, and Aleksandr L. Kuznetsov. "Technological solutions for cargo shipment through the container transport and technological systems." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 11.4 (2019): 609–620. DOI: 10.21821/2309-5180- 2019-11-4-609-620.
10. Izotov, O., A. Kuznetsov, and A. Gulyaev. "The prospects for freight forwarding container shipping." *Transport business of Russia* 4 (2019): 130–133.
11. Botnaryuk, M. V. "Analyses of market situation influence on competitive strategy of marine transport junction." *Zhurnal Universiteta vodnykh kommunikatsii* 1 (2010): 79–86.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

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

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Izotov, Oleg A. —
PhD
Admiral Makarov State University of Maritime
and Inland Shipping
5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg, 198035,
Russian Federation
e-mail: iztv65@rambler.ru, kaf_pgt@gumrf.ru

Статья поступила в редакцию 6 декабря 2019 г.
Received: December 6, 2019.

ВОДНЫЕ ПУТИ СООБЩЕНИЯ И ГИДРОГРАФИЯ

DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-6-1044-1055

HYDRAULIC RESISTANCE TO WATER FLOW AND SEDIMENT TRANSPORT IN RIVERS

G. L. Gladkov, M. V. Zhuravlev

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

In natural river flows, the processes of converting mechanical energy into heat, transporting sediment and deformations of the riverbeds form a single whole. Given that sediment transport and hydraulic resistance in rivers are interrelated, further improvement of sediment transport models is impossible without an assessment of the hydraulic resistance of the riverbed and assessment of the stability of soil particles that are different in grain size and constitute the bottom of the river.

The continuing uncertainty of the division of the complete resistance into grained and ridged components and form resistance made us to look for a new approach to the formulation of formulas of hydraulic resistance of beds with fine-grained bottom soils, the founder of which is K.V. Grishanin. The authors of the work, adhering to a new approach to the formulas preparation, have explored the hydraulic resistance in the conditions of unsteady changing the river flow movement - the resistance of the channel at individual crossings and sections of river bends. The results of the given studies represent the system of dependences of the Shezi coefficient in the flow rate function and average depth of flow for various morphological elements of channels. With the establishment of new dependencies, the calculation practice has received a description of the mechanism of interaction between the river flow and the moving channel, and the use of these formulas in the hydraulic calculations allows us to assess the impact of engineering water transport activities on the hydraulics of the river flow and the conditions of sediment transport in the rivers.

The results of research on the modelling of heterogeneous sediment loads in rivers are presented in the paper. The studies carried out by a number of domestic and foreign authors have made it possible to establish generally accepted criteria for the stability of the soil particle at the bottom of the flow with respect to the conditions of movement of heterogeneous soil, as well as to obtain a method for calculating the relative proportion of the granular roughness of the bottom in the ridged form of sediment movement in rivers. On this basis, the structure of a modified model of transport of multi-grained sediment in rivers has been developed and verified on the basis of materials of full-scale measurements on rivers. A modified model of sediment transport allows for an extension of its possible application for a wider range of particle sizes of mixed-grained bed sediments in rivers.

Keywords: river, bank, rift, morphometric characteristics of the channel, water flow rate, water consumption, sediment consumption, energy loss gradient, Shezi coefficient, tangential stress on bottom, channel reformation.

For citation:

Gladkov, Gennadii L., and Michail V. Zhuravlev. "Hydraulic resistance to water flow and sediment transport in rivers." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 11.6 (2019): 1044–1055. DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-6-1044-1055.

УДК 556.536

ГИДРАВЛИЧЕСКОЕ СОПРОТИВЛЕНИЕ ДВИЖЕНИЮ ВОДЫ И ТРАНСПОРТ НАНОСОВ В РЕКАХ

Г. Л. Гладков, М. В. Журавлев

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

Отмечается, что в естественных речных потоках процессы превращения механической энергии в теплоту, перемещения наносов и деформаций русел составляют единое целое. Учитывая, что транспорт наносов и гидравлическое сопротивление в реках взаимосвязаны, дальнейшее совершенствование моделей

транспорта наносов невозможно без оценки величины гидравлического сопротивления русла и устойчивости разнородных по крупности частиц грунта, слагающего дно реки. Сохраняющаяся на сегодняшний день неопределенность разделения полного сопротивления русла на зернистую и грядовую составляющие и сопротивление формы заставила искать новый подход к составлению формул гидравлического сопротивления русел с мелкозернистыми грунтами дна, основоположником которого является К. В. Гришанин. Придерживаясь нового подхода к составлению формул, в работе исследовано гидравлическое сопротивление в условиях неплавно изменяющегося движения речного потока — сопротивление русла на отдельных перекатах и на участках речных извилин. Результаты приведенных исследований представляют систему зависимостей коэффициента Шези в функции скорости течения и средней глубины потока для различных морфологических элементов русел. С установлением новых зависимостей расчетная практика получила описание механизма взаимодействия речного потока и подвижного русла, а использование в гидравлических расчетах данных формул позволяет оценить влияние инженерных водотранспортных мероприятий на гидравлику речного потока и условия транспорта наносов в реках. В работе приводятся результаты исследований, посвященных вопросам моделирования разнородных наносов в реках. Исследования, выполненные отечественными и зарубежными авторами, позволили установить общепринятые критерии устойчивости частицы грунта на дне потока применительно к условиям движения неоднородного грунта, а также получить методику вычисления относительной доли зернистой шероховатости дна при грядовой форме движения наносов в реках. На этой основе в исследовании разработана структура модифицированной модели транспорта разнородных наносов в реках и выполнена верификация ее по материалам натурных измерений на реках. Модифицированная модель транспорта наносов позволяет расширить область ее возможного применения для более широкого диапазона крупности частиц разнородного грунта донных отложений в реках.

Ключевые слова: река, берег, перекат, морфометрические характеристики русла, скорость течения воды, расход воды, расход наносов, градиент потерь энергии, коэффициент Шези, касательное напряжение на дне, русловые переформирования.

Для цитирования:

Гладков Г. Л. Гидравлическое сопротивление движению воды и транспорт наносов в реках / Г. Л. Гладков, М. В. Журавлев // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2019. — Т. 11. — № 6. — С. 1044–1055. DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-6-1044-1055.

Введение (Introduction)

Проблема составления прогноза русловых переформирований в реках с подвижными донными отложениями является одной из наиболее сложных в области речной гидравлики. Наряду с традиционными методами исследований в современной практике гидравлических расчетов широко используются методы математического моделирования. Решаемые задачи, связанные с вопросами моделирования характеристик движения воды в естественных руслах рек с деформируемым дном, являются чрезвычайно сложными.

На практике задача заключается в выполнении гидравлических расчетов характеристик течения воды и параметров транспорта наносов (деформаций дна) в реках. В расчетном смысле она сводится к решению численными методами известной системы уравнений движения воды, неразрывности и деформаций при заданных начальных и граничных условиях. Данная система уравнений с пятью неизвестными замыкается с помощью двух дополнительных расчетных зависимостей: закона гидравлического сопротивления в виде формулы коэффициента Шези и формулы расхода наносов. Поэтому качество выполняемых русловых прогнозов в значительной степени зависит от надежности оценки потерь энергии по длине и параметров транспорта наносов в деформируемом русле.

В естественных русловых потоках сопротивление движению воды создается группой факторов: зернистой шероховатостью дна, донными волнами — грядами и рифелями, русловыми формами — побочными, осередками и изгибами русла, водной растительностью, а в зимнее время — нижней поверхностью льда и шугой. Многообразие этих факторов и их изменчивость по длине потока и во времени делает расчет гидравлического сопротивления естественных русел сложной задачей. Степень влияния каждого из указанных факторов в общую величину потерь энергии по длине [1] различна в разных реках. Так, в реках с относительно крупными грунтами основное

сопротивление движению воды оказывает отрывное обтекание частиц грунта речного аллювия на дне потока. На практике применяются расчетные формулы коэффициента Шези, построенные в функции от величины безразмерной крупности донных отложений H/d . Предпочтение обычно отдается известным расчетным зависимостям, имеющим структуру формул А. П. Зегжды и Маннинга – Штриклера, которые дают достаточно близкие результаты. В реках с песчаными донными отложениями превалирует доля потерь энергии, обусловленная отрывным обтеканием гряд на дне реки. Существование обратной связи в системе *поток ↔ подвижное русло* позволило получить ряд перспективных формул для коэффициента Шези в функции скорости течения и безразмерной глубины потока применительно к условиям движения воды в плесовых ложбинах [2], на перекатах [3] и в речных излучинах [4]. Новые расчетные зависимости получили апробацию по данным натурных наблюдений на реках и материалам экспериментальных гидравлических исследований [5], [6].

Исследования, выполненные рядом отечественных и зарубежных авторов, позволили установить общепринятые критерии устойчивости частицы грунта на дне потока [7], [8] применительно к условиям движения неоднородного грунта [9], [10], а также получить методику вычисления относительной доли зернистой шероховатости дна [11] при грядовой форме движения наносов в реках. На этой основе в исследованиях авторов [12], [13] была разработана структура новой модели транспорта наносов.

В процессе дальнейшего расчетного обоснования в области транспорта наносов возникают объективные трудности. До настоящего времени вопросы оценки величины сопротивления движению воды и расхода наносов в русле реки изучались раздельно. Вместе с тем величина потерь энергии по длине, оцениваемая формулой Шези, входит в уравнение движения воды и в уравнение деформаций в составе формулы расхода наносов. Поэтому при анализе характеристик транспорта наносов в реках оказывается затруднительным найти объективные и физически измеряемые параметры перемещения частицы речного аллювия под действием текущей воды.

Основной целью настоящей работы является создание модифицированной модели транспорта разнозернистых наносов в реках на основе результатов выполненных ранее исследований и верификация ее по материалам натурных измерений на реках.

Методы и материалы (Methods and Materials)

В естественных русловых потоках с подвижным дном характеристики грядового рельефа дна — размеры гряд и скорость их перемещения — определяются скоростью течения воды и глубиной потока. От крупности донных частиц размеры гряд зависят слабо. Учитывая слабую зависимость величины потерь энергии по длине от крупности частиц в реках с мелкозернистыми донными отложениями, в дальнейшем можно отказаться от необходимости учета параметров, связанных с диаметром донных отложений. В данном случае связь между коэффициентом Шези и скоростью течения можно представить следующим набором масштабов подобия:

$$C/\sqrt{g} = f(U/\sqrt[3]{g\nu}, U/\sqrt{gH}, B/H). \quad (1)$$

В качестве параметра однозначности, учитывающего различные поперечные размеры потоков, здесь используется параметр B/H (где B — ширина русла; H — средняя глубина). Учитывается также, что перемещение мелких частиц не свободно от влияния вязкости воды.

Зависимость между величиной коэффициента Шези и скоростью течения воды может быть получена на основе установленного К. В. Гришаниным универсального параметра M , представляющего собой локальный инвариант подобия квазиравномерных потоков:

$$M = \frac{H(gB)^{1/4}}{Q^{1/2}} = \text{const}. \quad (2)$$

Параметр M представляет собой величину, обратную произведению критерия геометрического подобия B/H на критерий динамического подобия, — число Фруда в квадрате U^2/gH , входящие в состав набора масштабов подобия. Другой аргумент, представленный в функции (1) в виде скорости течения воды $U/\sqrt[3]{g\nu}$ нормированной величиной коэффициента кинематической вязко-

сти, есть корень кубический из произведения числа Рейнольдса на квадрат числа Фруда. Решая уравнение (2) совместно с формулой Шези, получим

$$C/\sqrt{g} = (1/M)U^{1/2} / (gB)^{1/4} I^{1/2}, \quad (3)$$

откуда следует, что в руслах рек, сложенных несвязными мелкозернистыми грунтами, при квазиравномерном течении воды коэффициент Шези пропорционален скорости течения в степени 1/2. На других морфологических элементах речного русла: перекатах, излучинах и русловых разветвлениях, где движение воды является неравномерным, можно ожидать иную степень зависимости величины коэффициента Шези от скорости течения.

Аргументами расхода русловых наносов в естественных потоках с мелкозернистыми песчаными донными отложениями служат: кинетичность потока, подвижность донных частиц и гидравлическое сопротивление речного русла. Коэффициент подвижности частиц донных отложений записывается в виде

$$\Theta \equiv \tau_* = \rho(U_*')^2 / (\rho_s - \rho)gd. \quad (4)$$

Расход наносов обычно представляется пропорциональным разнице значений влекущей силы потока $q_s \sim (\Theta - \Theta_c)^m$, где Θ_c — критическое значение коэффициента подвижности, отвечающее началу сдвига частиц на дне потока. При другом подходе аргументом расхода наносов является разность значений средней и неразмывающей скоростей течения воды. В подавляющем большинстве расчетных формул расхода наносов, полученных в лабораторных и в натурных условиях, установлена зависимость расхода наносов от определяющего аргумента — скорости течения воды в степени 3–4.

Большинство расчетных формул расхода наносов были получены экспериментально с однородным грунтом при безгрядовом дне. При применении этих формул в расчетах естественных речных потоков приходится корректировать величину критического значения коэффициента подвижности, выделяя так называемый «hiding/exposure-factor» с использованием выражения вида $\Theta_{ci} = \xi_i \Theta_{cm}$. Здесь Θ_{ci} и Θ_{cm} , соответственно, критические значения коэффициента подвижности для i -й фракции грунта и для частиц грунта средней крупности в смеси. С помощью такого подхода удастся учесть различную вероятность сдвига частиц грунта различной крупности в смеси на дне потока.

При вычислении коэффициента подвижности частиц при грядовом дне, необходимо корректировать величину коэффициента Шези, выделяя так называемый «ripple-factor» для оценки относительной доли грядовой шероховатости. Вследствие того, что разные авторы прибегают к различным приемам, в настоящей работе выполнена верификация ряда расчетных методик для оценки качества вычислений на основе массива натурных исходных данных.

По материалам Государственного водного кадастра, в течение различных периодов наблюдений была подготовлена база данных, содержащая результаты измерений гидравлических и морфометрических характеристик потока и русла на гидрологических постах, которая включает материалы измерений на двадцати девяти различных реках с общим объемом выборки около 900 измерений для верификации формулы коэффициента Шези. Объем выборки измеренных расходов наносов составил 296 измерений.

Результаты (Results)

Гидравлическое сопротивление движению воды в естественных руслах рек. В потоках с деформируемым руслом разделение потерь энергии по длине на зернистую и грядовую составляющие сопротивления движению воды затруднено в связи с отсутствием объективных критериев для оценки вклада действующих факторов в общую величину потерь. Это побуждает искать другие подходы к составлению формулы гидравлического сопротивления русел рек с мелкозернистыми грунтами дна. Учитывая, что основная доля потерь энергии по длине в реках с подвижным дном обусловлена наличием донных гряд, параметры которых, в свою очередь, определяются характеристиками течения воды, представляется целесообразным раскрыть зависимость

вида (3) путем установления прямой связи между коэффициентом Шези и скоростью течения воды. К. В. Гришанин в процессе исследования гидравлического сопротивления квазиравномерных потоков с песчаным дном и развитой грядовой шероховатостью (участки русел в прямолинейных плесовых лощинах) пришел к функциональной зависимости вида

$$C/\sqrt{g} = f(U/\sqrt[3]{gv}, B/H). \quad (5)$$

При выборе данных масштабов в качестве основных аргументов коэффициента Шези учитывалось, что сопротивление ровного дна, сложенного из частиц песчаной фракции, в принципе подвержено влиянию вязкости, в то время как вариации диаметра частиц в границах этой фракции не оказывают заметного влияния ни на сопротивление ровного дна, ни на грядовое сопротивление.

Полученная расчетная формула полного коэффициента Шези записывается в виде

$$C/\sqrt{g} = 5,25(U/\sqrt[3]{gv})^{1/2} (H/B)^{1/6}. \quad (6)$$

Формула (6) подтверждена с высоким для натуральных данных коэффициентом корреляции. Второй аргумент в данной формуле представляет собой безразмерную глубину потока или величину, обратную относительной ширине русла. Из полученной зависимости следует, во-первых, что при равных скоростях течения гидравлическое сопротивление движению воды в относительно более крупных и глубоких реках будет меньше, чем в мелких и широких, а во-вторых, что с ростом уровней воды в реке коэффициент Шези будет возрастать.

Изучая сопротивление русла на перекатах, Г. Л. Гладков предположил, что оно связано с кинетичностью потока. Основная гипотеза автора построена исходя из того, что при низких меженных уровнях размыв перекатов идет тем интенсивнее, чем больше уклон свободной поверхности I . Причем в ходе размыва средняя длина гряд l_r возрастает. Это позволяет считать, что между относительной длиной гряд l_r/H и уклоном I имеется соотношение пропорциональности $l_r/H \sim I$. Данное предположение позволило получить следующую зависимость:

$$C/\sqrt{g} \sim (U/\sqrt{gH})^{3/4}. \quad (7)$$

Для проверки высказанной гипотезы Г. Н. Гладков использовал материалы натуральных измерений на перекатах ряда судоходных рек, а также данные «Карт внутренних водных путей» участков ряда крупных судоходных рек России. В результате была получена формула для коэффициента Шези на перекатах с песчаными донными отложениями при низких уровнях воды:

$$C/\sqrt{g} = 71,4(U/\sqrt{gH})^{3/4}. \quad (8)$$

Позднее вся совокупность имеющихся натуральных данных была разделена на три группы. К первой группе были отнесены данные измерений на реках, когда скорости течения меньше неразмывающей скорости и транспорт наносов на участке отсутствует. Вторая группа включала в себя переходный диапазон изменения скоростей течения от неразмывающей до размывающей скорости. К третьей группе относились материалы натуральных наблюдений со скоростями течения, большими размывающих скоростей. В этой группе заведомо наблюдался транспорт наносов и существовала грядовая шероховатость. В общем объеме выборки натуральных данных к этой группе относятся 315 измерений. Учет влияния глубины потока в области подвижного русла позволил получить новую зависимость коэффициента Шези:

$$C/\sqrt{g} = 18,6(U/\sqrt{gH})^{3/4} (\sqrt[3]{gH^3/v^2})^{1/8}. \quad (9)$$

Полученная формула по точности не уступает расчетной формуле (6). Область их возможного применения на практике следует связать с размерностью, применяемой в расчетах гидродинамической модели. Формулу (6) можно рекомендовать при решении задач в одномерной постановке, а расчетную формулу вида (9), соответственно, в двухмерной. Возможная область их применения ограничивается совокупностью рек с песчаными грунтами дна при скоростях течения, обеспечивающих транспорт наносов в виде донных гряд.

М. В. Журавлев исследовал сопротивление песчаного русла на его изгибах. Основу расчетов составили материалы натуральных наблюдений на отдельных извилинах рек Вятки, Десны, Дона,

Иртыша, Луги и Оки. На всех участках дно было сложено мелким и средним песком и наблюдался грядовый транспорт наносов. Отношение r_0/B радиуса кривизны осевой линии русла к его средней ширине в пределах извилины составило у рассматриваемых изгибов 1,46–10,2. Данные по всем извилинам хорошо (с коэффициентом корреляции 0,92) удовлетворяют уравнению

$$C/\sqrt{g} = 42,25(U/\sqrt{gH})^{0,53}. \quad (10)$$

М. В. Журавлев, обработав материалы лабораторных исследований И. Ониши и Р. Хука, установил, что опыты в лотках дают такую же степенную функцию примерно с тем же показателем степени, что и в зависимости (10), но с меньшим значением коэффициента пропорциональности. Как натурным, так и экспериментальным данным удовлетворяет формула

$$C/\sqrt{g} = 1,12(U/\sqrt{g\nu})^{1/2}(r_0/H)^{1/6}. \quad (11)$$

Анализ полученных результатов показывает, что при различных морфологических элементах речного русла изменяется характер связи коэффициента Шези с определяющими факторами. В плесовых ложинах при квазиравномерном движении воды в реках основным аргументом сопротивления движению воды является скорость течения воды, представленная в формуле (6) в безразмерном виде. Функциональная связь с параметром B/H в полученной формуле оказалась слабее, чем со скоростью течения. Иная картина наблюдается на перекатах и в мелких плесовых ложинах при низких уровнях воды. Кинетичность потока в данных условиях возрастает, что приводит к усилению связи коэффициента Шези с глубиной потока. В речных излучинах встречаются оба вида русловых образований: перекаты и плесовые ложины, и могут реализовываться оба вида зависимостей коэффициента Шези.

С установлением новых зависимостей расчетная практика получила описание механизма взаимодействия речного потока и подвижного русла. Полученные формулы коэффициента Шези в неявном виде учитывают изменение параметров донных гряд и обусловленных ими потерь энергии по длине с изменением граничных условий движения воды. Использование в гидравлических расчетах данных формул позволяет оценить влияние инженерных воднотранспортных мероприятий на гидравлику речного потока и условия транспорта наносов в реках.

В практике гидравлических расчетов такого рода зависимости пока большого распространения не получили. В современных научных и экспериментальных исследованиях [14]–[16], а также в инженерной практике по-прежнему широко применяются традиционные методы вычислений, основанные на использовании расчетных формул типа Маннинга – Штриклера.

Моделирование транспорта разнозернистых наносов в реках. При моделировании транспорта разнозернистых наносов в реках в настоящее время авторы используют известную зависимость $\tau_{*c} = f(\text{Re}_{*c})$ для оценки критического касательного напряжения на дне, полученную Шильдсом для однородного грунта, которую корректируют при выполнении пофракционных расчетов. При этом значения параметра Шильдса и числа Рейнольдса зависят от величины динамической скорости:

$$\Theta_c \equiv \tau_{*c} = \frac{\rho(v_{*c})^2}{(\rho_s - \rho)gd}, \quad \text{Re}_{*c} = \frac{v_{*c}d}{\nu}. \quad (12)$$

В своей работе Л. ван Рейн [17] описал графическую зависимость Шильдса набором из пяти регрессионных расчетных зависимостей критического значения коэффициента подвижности от величины безразмерного диаметра частиц $D_* = (\rho'g/\nu^2)^{1/3}d$:

$$\begin{aligned} \Theta_c &= 0,24(D_*)^{-1}, & D_* &\leq 4; \\ \Theta_c &= 0,14(D_*)^{-0,64}, & 4 < D_* &\leq 10; \\ \Theta_c &= 0,04(D_*)^{-0,10}, & 10 < D_* &\leq 20; \\ \Theta_c &= 0,013(D_*)^{0,29}, & 20 < D_* &\leq 150; \\ \Theta_c &= 0,055, & D_* &> 150. \end{aligned} \quad (13)$$

В отечественной расчетной практике для оценки критического значения коэффициента подвижности широко используются результаты, полученные В. С. Кнорозом. В работе [18] установленная им связь критического значения коэффициента подвижности была аппроксимирована следующим выражением:

$$\Theta_c = 0,026 \left(\frac{D_* + 1,3}{D_* - 0,72} \right)^2. \quad (14)$$

Сопоставление материалов экспериментальных исследований Шильдса и Кнороза показывает, что в области относительно малых значений числа Рейнольдса Re_{*c} , отвечающих гидравлически гладкому и переходному режимам сопротивления, они дают достаточно близкие результаты при оценке критической величины коэффициента подвижности Θ_c . Начиная со значений $Re_{*c} \geq 10-15$ величина коэффициента подвижности по Шильдсу становится больше, чем по Кнорозу. В автомоделной области критическое значение коэффициента подвижности, по данным Шильдса, составляет $\Theta_c = 0,055$, а по данным Кнороза — $\Theta_c = 0,026$. Эта разница представляется существенной.

Условия сдвига неоднородных частиц грунта на дне оцениваются для каждой фракции в зависимости от среднего диаметра путем введения корректирующего коэффициента, учитывающего эффект «затенения» отдельной частицы грунта в смеси — так называемый «hiding/exposure-factor».

Б. Зенген выполнил анализ результатов исследований И. В. Егiazарова по проблеме оценки устойчивости частицы неоднородного грунта на дне речного потока. С учетом экспериментальных данных ряда других авторов предложена система расчетных зависимостей (Ашида – Егiazаров – Зенген) для величины критического значения коэффициента подвижности для фракции грунта в смеси:

$$\begin{aligned} \xi_i &= \frac{\Theta_{ci}}{\Theta_{cm}} = 0,85 \left(\frac{d_i}{d_m} \right)^{-1}, \quad 0 \leq \frac{d_i}{d_m} < 0,4; \\ \xi_i &= \frac{\Theta_{ci}}{\Theta_{cm}} = \left(\frac{\lg 19}{\lg 19 d_i / d_m} \right)^2, \quad 0,4 \leq \frac{d_i}{d_m} < 1,0; \\ \xi_i &= \frac{\Theta_{ci}}{\Theta_{cm}} = \left(\frac{d_i}{d_m} \right)^{-0,9}, \quad 1,0 \leq \frac{d_i}{d_m} < \infty. \end{aligned} \quad (15)$$

Дж. Рибберинк модифицировал широко известную формулу Э. Мейер-Петера и Р. Мюллера [19] применительно к пофракционному расчету расхода наносов. Полученные результаты позволили автору на основании анализа ряда апробированных методик выделить в расчетах относительную долю зернистой шероховатости, так называемый *ripple-фактор* в виде произведения $\mu \Theta_i$, где $\Theta_i = HI/d_i(\rho_s/\rho - 1)$ — коэффициент подвижности отдельной фракции грунта. Параметр μ в данном случае вычисляется в соответствии с известными рекомендациями по формуле $\mu = (K'_s/K_s)^{1/4} = (K'_s/(K'_s + K''_s))^{1/4}$. При этом эффективная высота выступов шероховатости на дне грядового потока рассчитывается в зависимости от среднего диаметра частиц: $K'_s = d_m + 1,6S_{dm}$, где $S_{dm} = \sqrt{\sum_i (d_i - d_m)^2}$.

Величина, характеризующая грядовое сопротивление речного дна, находится в зависимости от параметров донных гряд: $K''_s = 10h_d^2/L_d$, а сами параметры донных волн — высота (h_d) и длина (L_d) — вычисляются в соответствии с рекомендациями М. Ялина по формулам: $h_d = 1H/6(1 - \Theta_{cm}/\Theta_m) \times (1 - Fr^2)$ и $L_d = 5H$.

На основании приведенных ранее результатов исследований в работах авторов [18], [19] была получена структура модели транспорта разнозернистых наносов в реках, для верификации

которой был выполнен анализ и тестирование различных формул расхода наносов по материалам натурных измерений в реках.

Тестовые расчеты выполнялись для среднего диаметра частиц и пофракционно по формулам Л. ван Рейна [17], Э. Мейер-Петера и Мюллера [19], а также других авторов — всего 30 различных моделей расчета. Для пофракционного расчета расхода наносов использовались известные модификации формул, полученные Рибберинком [10] и Б. Зенгеном [11]. Общая характеристика выборки материалов измерений, использованных для тарировки модели транспорта наносов, представлена в таблице.

**Общая характеристика выборки данных измерений
для тарировки модели транспорта наносов**

Средняя скорость течения, м/с (от / до)	Средняя глубина, м (от/до)	Средний (геометрический) диаметр донных отложений мм (от/до)	Уклон свободной поверхности ‰ (от/до)	Температура воды, град, °С	Количество измерений
0,09/2,77	0,06/7,3	0,25/93,2	0,003/11,0	1,1/24,7	296

Основные результаты выполненных исследований заключаются в следующем.

Обсуждение (Discussion)

В ходе вычислений по каждой расчетной формуле между измеренными и рассчитанными расходами наносов строилась регрессионная зависимость вида $\ln(Q_s)_{\text{изм}} = a + b(\ln(Q_s)_{\text{расч}})$, по которой оценивалась корреляция данной связи. Другим критерием, определяющим качество вычислений по каждой модели, было установлено требование сохранить авторскую трактовку тестируемой формулы. При этом показатель степени при скорости течения (коэффициенте подвижности) в формуле расхода наносов останется неизменным при угловом коэффициенте $b = 1$ в уравнении регрессии.

Данные тестовых расчетов показали, что из всех рассмотренных вариантов наилучшие результаты вычислений получаются на основе исходной формулы Л. ван Рейна [11], разработанной автором для вычисления расхода мелкозернистых наносов в реках. Модификация данной зависимости позволила расширить область ее возможного применения для более широкого диапазона крупности частиц разнородного грунта донных отложений в реках. Полученная формула записывается в виде

$$q_s = AHU Fr^{2,4} \sum_{i=1}^n \beta_i \left(\frac{1 - \sqrt{\xi_i \Theta_{ci} / \mu \Theta_i}}{\sqrt{\rho_s / \rho - 1}} \right)^{2,4}. \quad (16)$$

Сопоставление рассчитанных значений расходов влекомых наносов с натурными данными свидетельствуют об их удовлетворительном совпадении. Коэффициент корреляции в уравнении регрессии составил 0,887. Значение свободного члена в модифицированной формуле Л. ван Рейна $A = 0,0014$. Величина углового коэффициента b в уравнении регрессии по результатам тестирования модели оказалась равной 0,997, что позволило сохранить неизменным в формуле (16) установленное автором значение показателя степени.

Качество вычисления расхода наносов по формуле Мейер-Петера и Мюллера в авторском виде и в различных вариантах ее модификации оказалось ниже, чем по формуле Л. ван Рейна. Во всех вариантах тестовых расчетов угловой коэффициент в уравнении регрессии оказался отличным от единицы и составил в среднем $b = 0,77$. В этой связи следует ограничить область возможного использования исходной зависимости МПМ-диапазоном значений диаметров крупных частиц, установленным автором при ее получении. И, наконец, вполне удовлетворительной по точности вычислений оказалась вероятностная формула Г. Эйнштейна [20]. По всем остальным расчетным зависимостям тестовые вычисления показали относительно более низкие результаты в сопоставлении с натурными данными.

Заключение (Conclusion)

Исследования, выполненные в настоящей работе, позволили получить новую модель транспорта наносов, пригодную для вычисления расхода разнотелых влеконых наносов в широком диапазоне изменения крупности частиц грунта донных отложений. Наилучшие результаты в сопоставлении с материалами натурных измерений на реках дала модифицированная формула Л. ван Рейна (1984). Эта формула была получена и протестирована по данным двухсот двадцати шести измерений на крупных реках. Диапазон значений диаметров частиц изменялся от 0,1 до 2,0 мм, глубины — от 1 до 20 м, а скорость течения — от 0,5 до 2,5 м/с. Изменение температуры при сопоставлении исходной зависимости не учитывалось — она была принята равной 15 °С. В рамках настоящей работы выполнено дополнительное тестирование формулы по данным 296 измерений на реках.

Усовершенствование формулы Л. ван Рейна было достигнуто в результате решения следующих вопросов. Разработанная модель транспорта наносов использует новое выражение (14) для оценки условий устойчивости частиц грунта на дне, полученное на основе экспериментальных данных В. С. Кнороза для широкого диапазона изменения крупности донных отложений. Применение формулы Кнороза привело к улучшению качества моделирования и позволило расширить область применения модифицированной зависимости.

В новой модели учтен эффект изменения критериальных условий сдвига частиц разнотелого грунта в смеси. Рекомендованная методика вычислений получена на основе независимых апробированных материалов теоретических и экспериментальных исследований, проведенных различными авторами. Выполненные расчеты свидетельствуют о том, что переход к пофракционному расчету расхода наносов дает улучшение качества моделирования. Другой аспект модификации заключается в использовании методики оценки относительной доли зернистой шероховатости при вычислении величины коэффициента подвижности в реках с грядовым дном. Тестовые расчеты в сопоставлении с натурными данными показали, что учет этого эффекта приводит к повышению качества работы модели.

Приведенные в работе результаты исследований в области оценки потерь энергии по длине можно рекомендовать использовать в следующих направлениях. Новые формулы коэффициента Шеши можно применять в гидравлических расчетах, выполняемых при вычислении отметок свободной поверхности в реках в результате решения уравнения движения воды. При вычислении расхода наносов с целью расчета деформаций русла эти зависимости можно применять в формулах расхода наносов, имеющих структуру $q_s \sim (U - U_c)^m$. В формулах расхода наносов, построенных на основе использования метода влекущей силы в виде разности касательных напряжений на дне потока, необходимо дополнительно выделять величину «ripple»-фактора, что представляет определенные затруднения в расчетах и приводит к увеличению общей погрешности вычислений.

В дальнейшем планируется выполнить тестирование по натурным данным различных формул коэффициента Шеши, полученных для оценки зернистой шероховатости дна. Следует полагать, что при использовании в реальных условиях традиционных формул типа Маннинга – Штриклера, Зегжды, а также ряда других авторов потребуется их корректировка по сравнению результатами, полученными ранее авторами в лабораторных условиях. Такой подход позволит упростить рекомендованную здесь модель транспорта наносов и повысит точность вычисления расхода наносов.

Качество результатов, полученных при создании и верификации численных моделей расхода русловых наносов в реках, в значительной степени зависит от надежности используемых натурных данных. Традиционные способы измерения расхода наносов донными батометрами, которые применялись ранее при проведении наблюдений на гидрометеорологических станциях и постах Росгидромета, имеют достаточно большую погрешность. Необходимо развивать используемую базу данных, ориентируясь на другие способы измерений. Такая работа была проведена в последние годы Государственным гидрологическим институтом [21]–[23]. Данное направление исследований, основанное на использовании методики расчета расхода русловых наносов

с использованием параметров донных гряд, может объективно привести к повышению качества прогнозов [24] русловых переформирований на реках. С этой целью необходимо получить надежные расчетные зависимости для определения размеров донных гряд и скорости их перемещения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гришанин К. В. Динамика русловых потоков / К. В. Гришанин. — Л.: Гидрометеиздат, 1979. — 311 с.
2. Гришанин К. В. Гидравлическое сопротивление естественных русел / К. В. Гришанин. — СПб.: Гидрометеиздат, 1992. — 182 с.
3. Gladkov G. L. Hydraulic resistance in natural channels with movable bed / G. L. Gladkov // Proc. of the Int. Symp. East- West, North- South Enc. on the State-of-the-art in Riv. Eng. Methods and Design Philosophies. — St. Petersburg, 1994. — Vol. 1. — Pp. 81–91.
4. Журавлев М. В. Гидравлическое сопротивление на повороте речного русла / М. В. Журавлев // Повышение пропускной способности портовых и судоходных сооружений: сб. тр. — Л.: ЛИВТ, 1987. — С. 184–190.
5. Onishi Y. Effects of meandering in alluvial streams / Y. Onishi, S. C. Jain, J. F. Kennedy // Journal of the Hydraulics Division. — 1976. — Vol. 102. — Is. 7. — Pp. 899–918.
6. Hooke R. L. B. Distribution of sediment transport and shear stress in a meander bend / R. L. B. Hooke // The Journal of geology. — 1975. — Vol. 83. — No. 5. — Pp. 543–565. DOI: 10.1086/628140
7. Shields A. Anwendung der Ähnlichkeitsmechanik und der Turbulenzforschung auf die Geschiebe Bewegung. Diss. / A. Shields. — Berlin, 1936. — 26 p.
8. Кнороз В. С. Неразмывающая скорость для несвязных грунтов и факторы, ее определяющие / В. С. Кнороз // Изв. ВНИИГ. — 1958. — Т. 59. — С. 62–81.
9. Egiazaroff I. V. Calculation of nonuniform sediment concentrations / I. V. Egiazaroff // Journal of the Hydraulics Division. — 1965. — Vol. 91. — Is. 4. — Pp. 225–247.
10. Ribberink J. S. Mathematical modelling of one dimensional morphological changes in rivers with non-uniform sediment. Report №.87-2 / J. S. Ribberink // Delft University of Technology, 1987. — 202 p.
11. Söhngen B. Modelling of the Danube and Isar rivers morphological evolution. Part 1: Measurements and Formulation / B. Söhngen, Y. Kellerman, G. Loy // Proc. 5th Int. Symp. on River Sedimentation, Karlsruhe. — 1992. — Vol. 3. — Pp. 1175–1207.
12. Gladkow G. L. Modellierung des Geschiebetransports mit unterschiedlicher Korngröße in Flüssen / G. L. Gladkow, B. Söhngen // Mitteilungsblatt der Bundesanstalt für Wasserbau. — Karlsruhe: Bundesanstalt für Wasserbau, 2000. — Nr. 82. — Pp. 123–130.
13. Gladkov G. L. Hydraulic resistance in water and river sediments transport / G. L. Gladkov // Proc. of the Int. Scientific Council on Erosion, River Channel and Mouth Processes. — Bydgoszcz, Poland: Inst. Of Geography at Kazimierz Wielki Univ, 2012. — Pp. 30–36.
14. Yang S. Q. Flow resistance and bed form geometry in a wide alluvial channel / S. Q. Yang, S. K. Tan, S. Y. Lim // Water resources research. — 2005. — Vol. 41. — Is. 9. DOI: 10.1029/2005WR004211.
15. Ferguson R. I. Flow resistance and hydraulic geometry in contrasting reaches of a bedrock channel / R. I. Ferguson [et al] // Water Resources Research. — 2017. — Vol. 53. — Is. 3. — Pp. 2278–2293. DOI: 10.1002/2016WR020233.
16. Stewart M. T. Hydraulic resistance in open-channel flows over self-affine rough beds / M. T. Stewart, S. M. Cameron, V. I. Nikora, A. Zampiron, I. Marusic // Journal of Hydraulic Research. — 2019. — Vol. 57. — Is. 2. — Pp. 183–196. DOI: 10.1080/00221686.2018.1473296.
17. Van Rijn L. C. Sediment transport, Part 1: Bed load transport / L. C. Van Rijn // Journal of Hydraulic Engineering. — 1984. — Vol. 110. — Is. 10. — Pp. 1431–1456. DOI: 10.1061/(ASCE)0733-9429(1984)110:10(1431).
18. Гладков Г. Л. Моделирование транспорта неоднородных крупнозернистых наносов в русле реки : сб. науч. тр. / Г. Л. Гладков. — СПб.: СПГУВК, 1996. — С. 288–304.
19. Meyer-Peter E. Formulas for bed-load transport / E. Meyer-Peter, R. Muller // Proceedings of 2nd meeting of the International Association for Hydraulic Structures Research. — Delft, 1948. — Pp. 39–64.
20. Einstein H. A. The bed-load function for sediment transportation in open channel flows / H. A. Einstein // Technical Bulletin. — U.S. Dept. of Agriculture, 1950. — No. 1026.
21. Самохвалова О. А. Дифференцированный подход к расчету расхода донных наносов в реках / О. А. Самохвалова // Современные проблемы науки и образования. — 2015. — № 1-2. — С. 269.

22. Копалиани З. Д. База данных «Данные измерений гидравлических характеристик транспорта донных наносов в больших, малых и средних равнинных реках» (свидетельство о государственной регистрации базы данных № 2017620992) / З. Д. Копалиани, О. А. Петровская // Официальный бюллетень «Программы для ЭВМ. Базы данных. Топологии интегральных микросхем». — 2017. — № 9 [Электронный ресурс]. — Режим доступа: http://www1.fips.ru/wps/PA_FipsPub/res/BULLETIN/PrEVM/2017/09/20/INDEX.HTM (дата обращения: 01.11.2017).

23. Копалиани З. Д. База данных «Данные измерений гидравлических характеристик транспорта донных наносов в гидравлических моделях горных рек и лотковых экспериментах» (свидетельство о государственной регистрации базы данных № 2017620878) / З. Д. Копалиани, О. А. Петровская // Там же. — 2017. — № 8 [Электронный ресурс]. — Режим доступа: http://www1.fips.ru/wps/PA_FipsPub/res/BULLETIN/PrEVM/2017/08/20/INDEX.HTM (дата обращения: 01.11.2017).

24. Гладков Г. Л. Гидроморфология русел судоходных рек: монография / Г. Л. Гладков, Р. С. Чалов, К. М. Беркович. — 2 изд., стер. — СПб.: Изд-во «Лань», 2019. — 432 с.

REFERENCES

1. Grishanin, K. V. *Dinamika ruslovykh potokov*. L.: Gidrometeoizdat, 1979.
2. Grishanin, K. V. *Gidravlichesкое soprotivlenie estestvennykh rusel*. SPb.: Gidrometeoizdat, 1992.
3. Gladkov, G. L. "Hydraulic resistance in natural channels with movable bed." *Proc. of the Int. Symp. East-West, North-South Enc. on the State-of-the-art in River Eng. Methods and Design Philosophies*. Vol. 1. St. Petersburg, 1994. 81–91.
4. Zhuravlev, M. V. "Gidravlichesкое soprotivlenie na povorote rechnogo rusla." *Povyshenie propusknoi sposobnosti portovykh i sudokhodnykh sooruzhenii: Sb. Trudov*. L.: LIVT, 1987. 184–190.
5. Onishi, Yasuo, S. C. Jain, and J. F. Kennedy. "Effects of meandering in alluvial streams." *Journal of the Hydraulics Division* 102.7 (1976): 899–918.
6. Hooke, Roger Le B. "Distribution of sediment transport and shear stress in a meander bend." *The Journal of geology* 83.5 (1975): 543–565. DOI: 10.1086/628140
7. Shields, Albert. *Anwendung der Ahnlichkeitsmechanik und der Turbulenzforschung auf die Geschiebe Bewegung*. Diss. Berlin, 1936.
8. Knoroz, V. S. "Nerazmyvayushchaya skorost' dlya nesvyaznykh gruntov i faktory, ee opredelyayushchie." *Izv. VNIIG* 59 (1958): 62–81.
9. Egiazaroff, I. V. "Calculation of nonuniform sediment concentrations." *Journal of the Hydraulics Division* 91.4 (1965): 225–247.
10. Ribberink, Jan S. *Mathematical modelling of one dimensional morphological changes in rivers with non-uniform sediment*. Report №.87-2. Delft University of Technology, 1987.
11. Söhngen, B., J. Kellermann, and G. Loy. "Modelling of the Danube and Isar Rivers morphological evolution. Part I: Measurements and formulation." *Proc. 5th Int. Symp. On River Sedimentation, Karlsruhe*. Vol. 3. 1992. 1175–1207.
12. Gladkow, G. L., and B. Söhngen. "Modellierung des Geschiebetransports mit unterschiedlicher Korngröße in Flüssen." *Mitteilungsblatt der Bundesanstalt für Wasserbau*. Nr. 82. Karlsruhe: Bundesanstalt für Wasserbau, 2000. 123–130.
13. Gladkov, G. L. "Hydraulic resistance in water and river sediments transport." *Proc. of the Int. Scientific Council on Erosion, River Channel and Mouth Processes*. Bydgoszcz, Poland: Inst. Of Geography at Kazimierz Wielki Univ, 2012. 30–36.
14. Yang, Shu-Qing, Soon-Keat Tan, and Siow-Yong Lim. "Flow resistance and bed form geometry in a wide alluvial channel." *Water resources research* 41.9 (2005). DOI: 10.1029/2005WR004211.
15. Ferguson, R.I., B.P. Sharma, R.J. Hardy, R.A. Hodge, and J. Warburton. "Flow resistance and hydraulic geometry in contrasting reaches of a bedrock channel." *Water Resources Research* 53.3 (2017): 2278–2293. DOI: 10.1002/2016WR020233.
16. Stewart, Mark T., Stuart M. Cameron, Vladimir I. Nikora, Andrea Zampiron, and Ivan Marusic. "Hydraulic resistance in open-channel flows over self-affine rough beds." *Journal of Hydraulic Research* 57.2 (2019): 183–196. DOI: 10.1080/00221686.2018.1473296.
17. Van Rijn, Leo C. "Sediment transport, Part 1: Bed load transport." *Journal of Hydraulic Engineering* 110.10 (1984): 1431–1456. DOI: 10.1061/(ASCE)0733-9429(1984)110:10(1431).

18. Gladkov, G.L. "Modelirovanie transporta neodnorodnykh krupnozernistykh nanosov v rusle reki." *Sb. nauchn. tr. SPGUVK*. SPb.: SPGUVK, 1996. 288–304.
19. Meyer-Peter, E., and R. Muller. "Formulas for bed-load transport." *Proceedings of 2nd meeting of the International Association for Hydraulic Structures Research*. Delft, 1948. 39–64.
20. Einstein, H. A. "The bed-load function for sediment transportation in open channel flows." *Technical Bulletin*. No. 1026. U. S. Dept. of Agriculture, 1950.
21. Samokhvalova, O. A. "Selective approach for bedload discharge calculations in rivers." *Modern problems of science and education* 1-2 (2015): 269.
22. Kopaliani, Z. D., and O. A. Petrovskaya. "Dannye izmerenii gidravlicheskiykh kharakteristik transporta donnykh nanosov v bol'shiykh, malykh i srednykh ravninnykh rekakh." *Ofitsial'nyi byulleten' «Programmy dlya EVM. Bazy dannykh. Topologii integral'nykh mikroskhem»* 9 (2017). Web. 1 Nov. 2017 <http://www1.fips.ru/wps/PA_FipsPub/res/BULLETIN/PrEVM/2017/09/20/INDEX.HTM>.
23. Kopaliani, Z. D., and O. A. Petrovskaya. "Dannye izmerenii gidravlicheskiykh kharakteristik transporta donnykh nanosov v gidravlicheskiykh modelyakh gornyykh rek i lotkovykh eksperi-mentakh." *Ofitsial'nyi byulleten' «Programmy dlya EVM. Bazy dannykh. Topologii integral'nykh mikroskhem»* 8 (2017). Web. 1 Nov. 2017 <http://www1.fips.ru/wps/PA_FipsPub/res/BULLETIN/PrEVM/2017/08/20/INDEX.HTM>.
24. Gladkov, G. L., R. S. Chalov, and K. M. Berkovich. *Gidromorfologiya rusel sudokhodnykh rek: Monografiya*. 2nd. SPb.: Izdatel'stvo Lan', 2019.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Гладков Геннадий Леонидович —
доктор технических наук, профессор
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала
С. О. Макарова»
198035, Российская Федерация, г. Санкт-Петербург,
ул. Двинская, 5/7
e-mail: gladkovgl@gumrf.ru
Журавлев Михаил Валентинович —
кандидат технических наук, доцент
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала
С. О. Макарова»
198035, Российская Федерация, г. Санкт-Петербург,
ул. Двинская, 5/7
e-mail: zhuravlevmv@gumrf.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Gladkov, Gennadii 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: gladkovgl@gumrf.ru
Zhuravlev, Michail V. —
PhD, associate professor
Admiral Makarov State University of Maritime
and Inland Shipping
5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg, 198035,
Russian Federation
e-mail: zhuravlevmv@gumrf.ru

Статья поступила в редакцию 25 ноября 2019 г.
Received: November 25, 2019.

**PROBLEMS OF BEACHES FORMATION IN THE SOUTH COAST
OF THE GULF OF FINLAND EASTERN PART****I. V. Kozhuhov¹, M. A. Spiridonov²**¹ — Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping,
St. Petersburg, Russian Federation² — A.P. Karpinsky Russian Geological Research Institute, 199106,
St. Petersburg, Russian Federation

An actual problem of international scale, dealing with formation and erosion of beach territories along the sea coasts, emphasizing the eastern part of the Gulf of Finland coastal zone is considered. Special importance of the problem is underlined concerning the global climatic change. Some considerations providing a general pattern of beach formation, based on the personal experience obtained by extended field studies, as well as from foreign sources of information and regional hydrometeorological service are given. Besides that an important source material for analytic studies are large-scale navigational charts of the eastern part of the Gulf of Finland. Based on that charts, according to external landscape peculiarities, three relatively independent parts of the coast are identified. For some reasons the main attention is paid to the adjacent to the Neva Bay part of the coast: Shepelevski Cape — Bolshaya Ishora settlement. The study results the identification of role of the main structural beach elements in the backshore formation. The importance of long-shore coastal bars in formation and development of beaches is specially mentioned. Besides that, the reasons of insufficient beach development of the Southern part of the Bay of Finland belonging to the Russian Federation are indicated. Some negative role of the London Bank as a factor inhibiting the beach-forming processes and aggravating the environmental state on this coastal segment is specially marked. In this study attention is also paid to some methodical items. As main approach allowing us to carry out the coastal processes control, a large-scale secondary survey with multi-beam echo-sounder is used. Such approach is fruitful at the bottom topographic peculiarities investigation presented by 3D-format. The applied aim of such techniques is underwater relief transformation control as a result of storm activity. The use of a millimeter-wave radio signal allowing broad storm skyline examination for investigating the coastal refraction as a main relief-forming factor on sea shallow waters can be considered an equally significant approach. The study results the recommendations for improving the environmental situation of the coast. At the same time, the issue of artificial beach formation based on the theoretical assumptions stated in this paper is considered. Application of special dredge pump suitable for near-surface operation in the sea surf band is discussed.

Keywords: beach, sand, long-shore bar, dune, abrasion shelf, surge, London Bank, suspension current, eolation, dredge pump.

For citation:

Kozhuhov, Igor V., and Mikhail A. Spiridonov. "Problems of beaches formation in the south coast of the Gulf of Finland eastern part." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 11.6 (2019): 1056–1069. DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-6-1056-1069.

УДК 911.9**ПРОБЛЕМЫ ФОРМИРОВАНИЯ ПЛЯЖЕЙ В УСЛОВИЯХ
ЮЖНОГО ПОБЕРЕЖЬЯ ВОСТОЧНОЙ ЧАСТИ ФИНСКОГО ЗАЛИВА****И. В. Кожухов¹, М. А. Спиридонов²**¹ — ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова»,
Санкт-Петербург, Российская Федерация² — Всероссийский научно-исследовательский геологический институт
им. А. П. Карпинского, Санкт-Петербург, Российская Федерация

Рассмотрена актуальная проблема, касающаяся эволюции пляжных территорий вдоль морских побережий, с акцентированием внимания на береговой зоне восточной части Финского залива. Отмечена особая актуальность указанной проблематики в связи с изменением климатических условий в масшта-

бах планеты в целом. Изложены соображения, дающие общую схему формирования пляжей как таковых на основании личного опыта, а также за счет использования специализированных зарубежных источников с привлечением материалов региональной гидрометслужбы. Кроме того, важным исходным материалом для аналитических проработок послужили крупномасштабные навигационные карты восточной части Финского залива. По ряду причин главное внимание в работе было уделено наиболее приближенному к Невской губе отрезку побережья: мыс Шепелево – населенный пункт Большая Ижора. В процессе обработки материалов была выявлена роль главных элементов пляжей при формировании их надводной части (суши). Отмечается особое значение приурезовых береговых валов в создании и развитии пляжных территорий. Указана негативная роль Лондонской отмели, служащей подводным препятствием для процесса пляжеобразования и одновременно ухудшающей экологическое состояние на данном береговом отрезке. В качестве основных подходов, позволяющих осуществлять управление прибрежными процессами, служит крупномасштабный повторный промер с использованием многолучевых эхолотов (МЛЭ). Не менее существенным в методическом плане можно считать использование радиосигнала миллиметрового диапазона, дающего возможность обследовать панорамы шторма в широком пространственном охвате для изучения прибрежных рефракционных полей как главного рельефообразующего фактора на морских мелководьях. Итогом работы послужили рекомендации по улучшению экологической обстановки побережья. Одновременно в работе рассмотрен вопрос об искусственном наращивании пляжей, которое следует осуществлять с учетом изложенных в статье теоретических выкладок. Ставится вопрос о применении специальных рефулерных механизмов, приспособленных для вскрышных работ на малых глубинах, особенно в полосе морского прибоя.

Ключевые слова: пляж, песок, береговой вал, дюна, абразионный уступ, волновой накат, Лондонская отмель, твердые потоки, эоловый процесс, рефулерные устройства.

Для цитирования:

Кожухов И. В. Проблемы формирования пляжей в условиях южного побережья восточной части Финского залива / И. В. Кожухов, М. А. Спиридонов // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2019. — Т. 11. — № 6. — С. 1056–1069. DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-6-1056-1069.

Введение (Introduction)

Побережья морей и океанов являются весьма активными геодинамическими зонами. Их ландшафтное положение на границе суши и моря обеспечивает высокий потенциал современных преобразований рельефа, с которым тесно связаны изменения природных территориальных комплексов. По мере накопления соответствующих знаний, появились достаточные основания для решения практических задач, связанных, например, с добычей строительных материалов в береговой зоне, проблемами берегозащиты, а также с вопросами навигационного, экологического или курортно-рекреационного направлений.

Наиболее существенным в настоящий момент можно считать вопрос сохранения или наращивания пляжных территорий. Актуальность данной темы, в частности, связана с усилением абразионных процессов в том числе вдоль побережья восточной части Финского залива. Так, уже в XIX в., по мнению В. В. Лонгинова [1, с. 170], начали появляться первые научные концепции, способные объяснить причину таких изменений. В качестве примера достаточно привести несколько крупных обобщений монографического характера в XX в. Это работы В. М. Дэвиса (1909), Д. Джонсона (1919), П. К. Божича (1930), Т. Мунх-Петерсона (1933) В. П. Зенковича (1946) и др. [2], [3]. В них было установлено, что берега меняют свое положение, то отступая под натиском моря, то отвоевая морские пространства и заменяя их сушей. Были выделены два основных типа процессов, ход которых определяет подобные изменения, это *абразия* и *аккумуляция*. Соответственно были обозначены и основные генетические типы берегов: абразионные и аккумулятивные, а затем их географические разновидности (фиордовый, бухтовый, рiasовый и др.). Следующим этапом указанных исследований явилось выявление двух главных процессов переноса вещества, оказывающих влияние на изменение контура берегов: продольный (вдольбереговой) и поперечный потоки наносов.

Теоретически сложилось представление о том, что в динамике береговых процессов повсеместно ведущую роль играет транзитное вещество, изначально имеющее аллювиальное происхождение, т. е. поставляемое в береговую зону руслами рек. Вместе с тем развивались представления

и о береговых циркуляционных ячейках на участках берегов, достаточно удаленных от устьев крупных рек. Особенно явно это заметно на примере бухтовых берегов, где единый вдольбереговой поток наносов фактически прерывается наличием абразионных участков. Здесь отчетливо видно, что в формировании твердого потока большое участие принимает местный материал. Часть этого материала формируется за счет абразии (разрушения) разделяющих бухты мысов, а часть поступает со склонов, опирающихся на береговую зону [4]. К тому же в настоящее время дополнительную актуальность приобретают знания об эволюционном изменении развития береговых морфосистем в связи с прогнозом повышения уровня Мирового океана. Эти сведения позволяют, как мы полагаем, осуществить геоморфологический и географический прогноз изменения берегового контура в связи с ранее указанным общим повышением среднего океанического уровня, в том числе в пределах замкнутых морских водоемов [5]. Авторам работы не удалось обнаружить в периодической литературе и фундаментальных трудах описаний поэтапного формирования пляжных территорий в реальном времени как процессов противостояния энергии морского прибоя и динамики ветровых процессов.

В настоящей статье основное внимание уделено конкретному вопросу формирования пляжей на примере природного ландшафта части южного побережья Финского залива.

Целью настоящей работы служит попытка изменения гидрологического режима в пределах обозначенного побережья для интенсификации процессов пляжеобразования.

Методы и материалы (Methods and Materials)

В процессе работы над статьей были проанализированы материалы ГМС по интересующему региону, касающиеся ветрового режима и гидрологических характеристик изучаемого объекта. Кроме того, важным материалом в процессе предварительной работы послужили крупномасштабные навигационные карты восточной части Финского залива. По мере работы были использованы также труды отечественных и зарубежных специалистов по пляжной тематике, и в первую очередь работы В. Баскома и В. Л. Болдырева [6], [7].

Многолетние гидрометеорологические наблюдения служат надежным фундаментом, дающим общие представления о режимных характеристиках того или иного природного объекта. Однако, при решении затронутых в статье вопросов подобный материал дает лишь некую обобщенную картину процесса, подразумевающую на дальнейшем этапе исследований переход к более конкретным его деталям. Как показал многолетний опыт, существующие в инженерной гидрологии подходы не дают должного эффекта при решении многих прикладных задач береговой зоны [8]–[10]. К подобным проблемам можно отнести, например, защиту прибрежного морского дна и прилегающих берегов от разрушений и борьбу за сохранность искусственных глубин на судоходных фарватерах, а кроме того, вопросы наращивания сухих пляжей или создание искусственных мысов.

В существующей структуре твердого потока рельефообразующую роль играет придонный горизонт. Важнейшей деталью при этом служит проявляемое свойство дискретности, когда по мере перемещения наносов движущие сыпучие массы группируются в отдельные выпуклые образования в виде микрорельефа, достаточно легко распознаваемые в пространстве. Т. е. на поверхности дна в пределах морских мелководий при достаточном количестве песчаного материала образуются положительные формы рельефа типа гряд, песчаных волн или подводных песчаных валов [11]. Повторные батиметрические съемки позволяют опознавать указанные формы и контролировать их перемещение в пространстве. Данная парадигма, соответственно, подразумевает иной подход непосредственно к методике наблюдений. Отсюда среди инструментальных методов наиболее эффективными можно считать приемы инженерной гидрографии с применением новейших узколучевых сонаров — многолучевых эхолотов (МЛЭ). Основное внимание уделяется мелководным МЛЭ, способным работать на одной из частот в диапазоне 200–400 кГц в режиме линейно-частотной модуляции [12]. Для традиционной гидрографии, связанной с созданием морских навигационных карт, планшеты имеют масштабы, как правило, не крупнее 1:10 000. В случае инженерных батиметрических съемок масштабы отчетных планшетов чаще всего составляют 1:5 000 и более, поскольку конечных потребителей обычно интересуют именно детали микроре-

льефа, которые могут быть отображены только на крупных масштабах, однако они плохо воспринимаются в традиционном плоском (2D) изображении. Поэтому в конкретном случае внимание должно быть уделено подготовке результатов крупномасштабных съемок в трехмерном (3D) изображении. Представление рельефа в объемном виде, т. е. его *визуализация*, позволяет даже неспециалистам легко ориентироваться в деталях подводной топографии. Для реализации подобного подхода существуют специальные пакеты программ.

В целях изучения затронутых вопросов не менее значимым является использование радиоволн миллиметрового диапазона. С помощью радиосигнала на индикаторе кругового обзора (экране) легко воспроизводится в плоском формате пространственная картина волнения на подходах к берегу. Радиолокационный контроль позволяет достаточно просто определять значения периодов волн, фазовые волновые скорости перемещения их гребней, а также одну из существенных характеристик волнового поля на мелководье — ориентацию волновых фронтов относительно берега, т. е. углов подхода волн к береговой черте. Известно, что для количественной оценки вдольберегового твердого расхода основополагающими переменными, определяющими искомую величину, служат указанные ранее характеристики: высота волны h , средний уклон морского дна $\tan \beta$ и угол подхода волны к берегу α . При этом особую значимость из трех указанных величин приобретает переменная α в ее спектральном выражении. Последнее связано с наибольшей изменчивостью данной характеристики на коротких дистанциях по сравнению с остальными приведенными величинами. В силу неровностей микрорельефа за счет сложной подчас конфигурации береговой линии векторные характеристики волновых лучей от точки к точке могут меняться в достаточно широком интервале. Это и должно оказывать главное влияние на характер градиентов твердого расхода. В случае их положительных значений в рассматриваемом месте будет преобладать аккумулятивный процесс, а при отрицательных градиентах, наоборот, должны наблюдаться процессы эрозийного типа. Таким образом, «зрячие» радиолокационные средства с достаточной надежностью способны в любое время суток высвечивать на экране четкое изображение целого сектора водной поверхности. Все это позволяет почти во всех деталях, за исключением волновых высот, отслеживать подобные процессы в реальном времени, т. е. дает возможность получать ряд характеристик, свойственных различным фазам шторма на этапах его зарождения, стабилизации или затухания.

Основная часть (Main Part)

Прибойные потоки у морского берега, так называемая *зона волнового заплеска*, возникают между разрушающимся фронтом волны и границами волнового наката на сушу. По мере перемещения новых порций сыпучего материала в сторону берега там происходит нарастание пляжа, часть которого постепенно выходит из-под влияния волн. Образуется надводная береговая терраса, которая, собственно, и воспринимается в быту как пляж. Подобный элемент прибрежного ландшафта отличается достаточным разнообразием. Т. е. типов пляжей насчитывается немало количество.

В материалах по системным исследованиям в разделах изучения земных ландшафтов используется термин «геокомплексы», близкий по смыслу к понятию «экосистема». По мнению специалистов, геокомплексы как таковые воспринимаются в виде систем двух типов: замкнутых и разомкнутых: «Замкнутые комплексы обладают циркуляционным механизмом перемещения вещества, т. е. импульс в направлении «вход – выход» в них относительно мал <...>. Разомкнутые геокомплексы образованы односторонним движением вещества» [13, с. 104].

Среди множества разновидностей пляжей можно выделить немало объектов замкнутого типа. К ним следует отнести, например, «запертые» пляжи, расположенные между двумя скалистыми мысами. В подобных случаях в процессах литодинамики, по В. Баскому, преобладает поперечный тип движения песков в виде замкнутой схемы: с моря на берег и обратно. Вдольбереговая составляющая здесь выражена крайне слабо.

Предметом исследования настоящей работы служат песчаные пляжи открытого типа в условиях отмелого берега. Схему движения масс твердого материала в районах открытых пляжей

можно отнести к типу разомкнутых. В подобном случае процесс формирования прибрежных аккумулятивных форм зависит не только от поперечного движения твердого вещества, но, в не меньшей степени, и от характера его продольной составляющей [15]. Соотношение влияния обоих направлений (поперечного и вдольберегового) должно определяться своеобразием местных условий [16], [17]. Понятно, что часть перемещаемых штормом к берегу песков служит материалом для регулярной подпитки надводной части пляжной полосы и фактически должна выпадать из общего баланса прибрежного твердого расхода, сообразно в дальнейшем влиянию наземных эоловых процессов [18]. Недостаток безвозвратно утраченных морем песчаных масс при этом компенсируется за счет вдольберегового транзита твердого вещества, обеспечивая системе в целом состояние относительной устойчивости. Помимо линейных параметров (ширины и протяженности) типичный песчаный пляж включает три существенных морфологических элемента, а именно: береговой вал, надводную террасу (пляжевую ступень) и тыльную часть пляжной полосы (как правило, дюну). Береговой вал как самостоятельное образование формируется на границе между сушей и водой благодаря намыву песков (или гальки) к самому урезу ослабленной прибойной волной. Следующая часть пляжной полосы — надводная терраса — в большей степени подвержена воздействию эоловых процессов. Известно, что ветровые потоки смещают к тыльной части пляжа массы накапливаемого песка, формируя еще один существенный элемент пляжной территории — дюну (авандюну) либо группу параллельных друг другу дюн [19].

Как правило, малопримечательный на вид береговой вал играет, тем не менее, весьма существенную, порой ключевую, роль в плане развития пляжной системы в целом. Его наличие и размеры в значительной степени зависят от активности волноприбойных процессов. По состоянию берегового вала можно судить о степени эффективности прибойного волнового потока как инструмента «доставки» пляжного материала к берегу, т. е. самой перспективы существования пляжа. Четко выраженный в рельефе вал свидетельствует о высокой интенсивности волновых процессов, когда силы ветрового переноса по своей активности уступают воздействию морской стихии. Таким образом, основополагающим — «стартовым» элементом формирования пляжной полосы должен быть именно береговой вал, с которого, собственно, и начинается процесс надводного пляжеобразования. Типичный профиль открытого пляжа приведен на рис. 1.

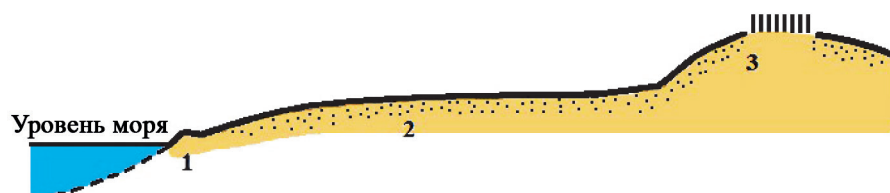


Рис. 1. Профиль развитого песчаного пляжа:
1 — береговой вал; 2 — надводная терраса; 3 — дюна
Условные обозначения: [штрихи] — растительность

В тыльной части пляжа располагается, как правило, авандюна. Данный элемент прибрежного рельефа можно воспринимать как своеобразное «хранилище» избыточных песчаных масс. Степень развития авандюны является еще одним внешним признаком, по наличию которого также можно судить о состоянии конкретной пляжной полосы. По размерам и форме авандюны можно определять качество пляжа и даже перспективу его дальнейшего развития. В случае слишком высоких темпов поступления наносов к береговой черте со стороны моря, т. е. при избытке песчаных масс, движимых в сторону суши, на прилегающей территории берега может формироваться не одна дюна, а целые ряды параллельных друг к другу аналогичных образований. В исключительных случаях подвижные дюны способны, подобно барханам, «атаковать» ближайшие населенные пункты. Известен эпизод на Куршской косе литовского берега, когда в XIX в. песчаными дюнами был засыпан ряд близлежащих деревень.

В случае слабо выраженного в рельефе берегового вала или его полного отсутствия можно утверждать, что интенсивность песчаной подпитки пляжа по каким-то причинам снизилась либо вообще свелась к нулю. В подобных ситуациях в системе «пляж» должно наблюдаться нарушение равновесия между влиянием прибоя и эоловым фактором при явном преобладании ветровой составляющей. В результате песчаная масса постепенно сокращается и рассеивается, удаляясь вглубь суши. В подобных случаях ослабленный импульс на входе (энергия прибоя) и более существенный на выходе (ветровой процесс) приводят к постепенному сокращению дюны, а затем и возможной деградации пляжа в целом. Характерным признаком подобных тенденций служит состояние лесонасаждений с тыльной части берега, где местами в результате выдувания песчаного грунта прослеживаются обнаженные корневые системы деревьев [20].

Не менее серьезной причиной разрушения пляжных территорий, безусловно, являются размыты, которые наблюдаются, как правило, в периоды всплесков штормовой активности. По мнению специалиста по морским берегам, В. Баскома «существует весьма чуткое равновесие между силами, которые приносят песок на берег, и силами, уносящими его в море» [6, с. 195]. Важно знать, что линейные характеристики пляжей, главным образом их поперечные размеры, могут заметно варьировать в зависимости от сезона. В частности, отмечается, что в зимне-осенний период года с учащением штормовой деятельности интенсивность расходования волновой энергии возрастает. Ухудшение гидрометеорологической обстановки в осенне-зимний период года чаще всего ведет к сокращению пляжной полосы по ширине [21], [22], в то время как в весенне-летний период при слабом и умеренном волнении эти размеры обычно восстанавливаются. По данному вопросу В. Баском отмечает следующее «... мелкие волны будут приносить песок на берег, а крупные — уносить его обратно в море» [6, с. 195]. Исключением может служить ситуация, когда в процесс вписывается какой-то посторонний внешний фактор.

Опыт работы на объектах замкнутого типа подтверждает высокую значимость именно поперечного движения обломочного материала по системе: «море → пляж; пляж → море». Что касается открытых берегов, то здесь в качестве серьезного дополнительного фактора в процессах пляжеобразования, как отмечалось ранее, выступает вдольбереговой перенос обломочного материала. При этом, если формирование подводных песчаных валов является следствием поперечного движения водных масс, то вдольбереговая составляющая служит решающим фактором при формировании аккумулятивных структур типа баров либо кос [23].

Характерной чертой любой пляжной полосы в активной фазе является отсутствие в ее пределах устойчивого травяного покрова. Отмеченная особенность служит доказательством высокой динамичности указанной зоны, где исключена возможность массового укоренения растений. Поэтому случаи покрытия поверхности пляжа плотной растительностью означают прекращение в данном месте эффективных волновых процессов. В подобной ситуации понятие «пляж» фактически теряет смысл. Отрезок южной части побережья Финского залива, находящийся под юрисдикцией Российской Федерации, начинается непосредственно у российско-эстонской границы (вблизи пункта Каростель), огибает полуостров Курголовский, обходя мыс Питкинен-Нос, и заканчивается в районе населенного пункта Большая Ижора. На рис. 2 приведена наибольшая по протяженности часть исследуемого побережья, за исключением последнего перед дамбой отрезка береговой линии. Общая циркуляция течений, присущая всем крупным водоемам северного полушария, ориентирована, как известно, против часовой стрелки. Согласно данному закону, генеральный дрейф водных масс вдоль всего южного берега осуществляется в направлении запад → восток, а вдоль северного побережья Финского залива, наоборот, в направлении восток → запад.

Ветровой режим в Северо-Западном регионе РФ в целом формируется главным образом под влиянием атлантических циклонов. Отсюда активными ветрами для всего южного побережья с учетом положения его береговой линии относительно стран света являются ветры западной, северо-западной и северной четверти. Южные ветры здесь практически незначимы с точки зрения заметного влияния на прибрежную полосу, поскольку в силу географических особенностей действуют со стороны суши.

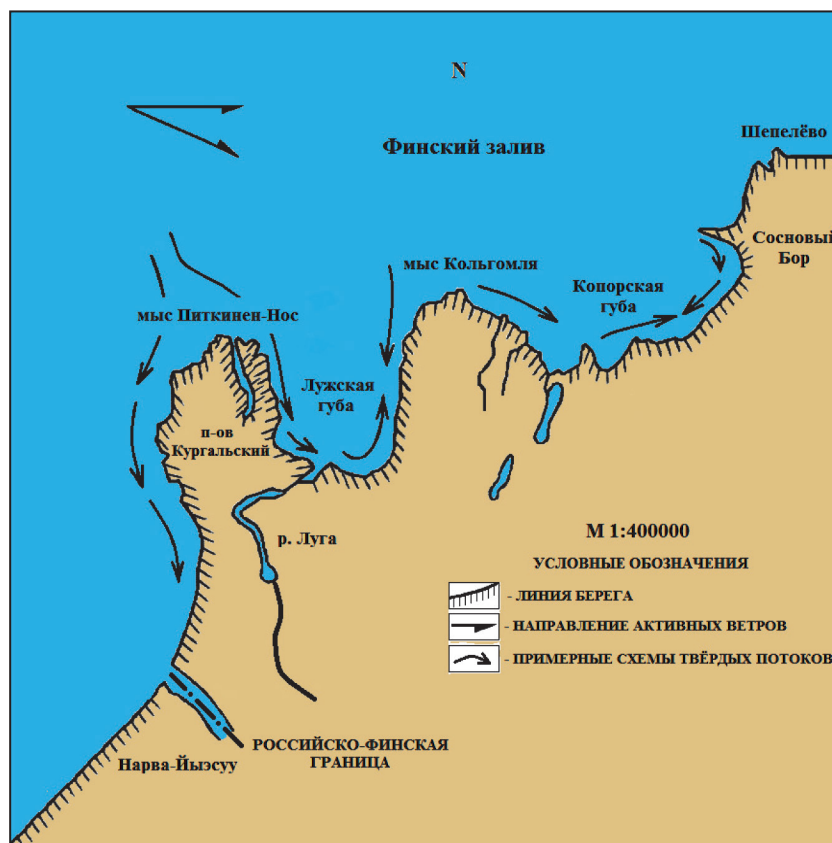


Рис. 2. Схема отрезка южной части побережья Финского залива

На завершающем участке побережья от мыса Шепелево до пункта Большая Ижора схема общей циркуляции дополняется и усиливается в периоды ветровой активности временными штормовыми потоками, ориентируемыми вдоль берега также в направлении запад → восток. По разнообразию ландшафтных характеристик южный берег Финского залива в пределах Российской Федерации можно подразделить на три более или менее самостоятельных зоны. Критерием подобного деления служат особенности экспозиции береговой линии по отношению к странам света и сама ее конфигурация.

Начиная от государственной российско-эстонской границы ближайшим относительно автономным участком российской территории можно считать полосу слабо вогнутого берега, близкого по типу к прямолинейному, охватывающего часть берегового контура Нарвского залива. Лишь на некотором его отрезке, а именно с наветренной стороны полуострова Кургальский, линия берега приобретает иззубренный характер. Обозначенная приграничная часть побережья ориентирована строго на запад. В качестве так называемых *опасных ветров*, способных создавать значительный волнообразующий эффект в этом месте, служат ветры западной, северо-западной и северной четверти при достаточно солидной для настоящего водоема дистанции волнового разгона.

По мере движения в восточном направлении от мыса Питкинен-Нос (конечной точки Курголовского полуострова) можно наблюдать существенное изменение общего положения береговой линии с резким разворотом к северу. Новый участок побережья по своему типу значительно отличается от предшествующего. В данном случае речь идет уже о береговой линии бухтового типа. Лужская и Копорская губы достаточно глубоко вдаются в сушу, превращаясь, в некотором смысле, в обособленные микроводоемы с местным волновым режимом и собственной кинематикой временных штормовых потоков.

Как известно, при сложном контуре береговой линии на ее бухтовых участках наблюдается *рефракция*, т. е. искажение волновых полей, что оказывает сильное влияние на характер и особен-

ности процессов литодинамики. Более того, в пределах самой Копорской губы берег дополнительно усложнен мысами Дубовским и Устинским, выдвинутыми в море почти на 500 м. Иными словами, помимо непростого рисунка волновых фронтов, порождаемого неровностями дна на мелководье, процессы рефракции дополнительно усиливаются здесь за счет местных береговых выступов и достаточно крупных мысов. Изменчивый характер береговой линии и ее сложная конфигурация меняют от места к месту значения углов подхода волн к урезу, что нарушает цельность в процессе переноса песчаных масс вдоль берега. Учитывая данное обстоятельство, преждевременно делать какие-либо выводы, касающиеся режима перемещения наносов в пределах описываемой части побережья, и тем более давать прогностические оценки его состояния. Для этого необходимо обладать по данному району хотя бы минимальной информацией, включающей материалы указанной ранее крупномасштабной батиметрической съемки дна и векторные характеристики волновых полей.

Следующая часть южного побережья, территориально наиболее приближенная к Санкт-Петербургу, расположена в восточной части Финского залива — от мыса Шепелево до населенного пункта Большая Ижора. Этот участок южного морского берега четко ориентирован на север северо-восток (рис. 3). Чуть восточнее Большой Ижоры линия берега стыкуется с «корневой» частью западного крыла Комплекса защитных сооружений Санкт-Петербурга от наводнений — дамбы. Именно последняя часть южного побережья в рамках настоящей статьи представляется наиболее актуальной. Указанный фрагмент береговой линии длиной около 30 км можно считать наиболее проблемным в плане экологии, а также по ряду иных причин. На всем своем протяжении, за исключением бухты Черная Лахта, берег здесь достаточно однообразен. Однако считать его исключительно прямолинейным не совсем верно. Так, ведущий научный сотрудник АО ИОРАН, кандидат географических наук, геоморфолог В. Л. Болдырев при оценке состояния пляжей по их внешним признакам считал хорошо развитыми пляжными участками те, ширина которых составляет величину от 70 м и более. Поперечные размеры пляжной полосы в пределах 40–50 м отнесены им к зонам так называемого *транзитного режима*. И, наконец, в местах, где поперечные габариты пляжей менее 40 м, налицо признаки дефицита наносов [24]. Следует отметить, что слабо развитые пляжи, а порой их полное отсутствие являются признаком нарушения пляжеобразующей функции волноприбойного механизма.

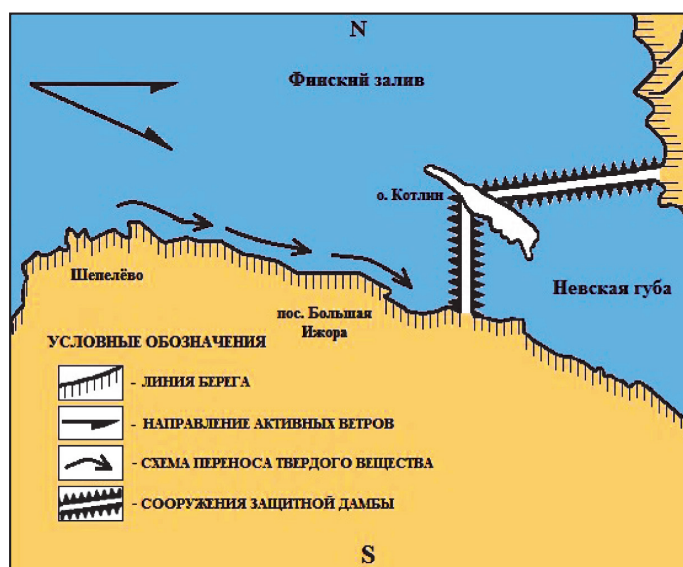


Рис. 3. Отрезок восточной части южного побережья Финского залива (схема вдольберегового потока наносов)

В режимном отношении обозначенный, третий по счету, отрезок берега в значительной своей части находится в не совсем благоприятных условиях. В первую очередь это касается участков

с очевидными следами абразии. На всем протяжении таких участков периодически встречаются места экстремальных разрушений береговых уступов. Одновременно обращает на себя внимание скудность пляжных территорий с явными признаками дефицита песчаных масс. Одним из индикаторов подобного состояния служит, в частности, наличие на отрезках песчаного побережья участков из валунно-галечного материала.

Обсуждение (Discussion)

Для выяснения причин создавшихся условий на южном побережье Финского залива следует сравнить его ландшафтные характеристики с близким по широтному расположению и природным особенностям побережьем Латвии. Пляжам Юрмалы, как известно, свойственны хорошо развитые песчаные территории, которые широко используются в курортной индустрии [25]. Обращает на себя внимание, что при сравнительной оценке указанных побережий Финского и Рижского заливов обнаруживается определенная природная схожесть этих двух объектов. Оба побережья расположены с южной стороны достаточно крупных водоемов в условиях, близких по своим широтно-климатическим характеристикам, и относятся к категории песчаных берегов отмелого типа. В обоих случаях береговые линии ориентированы в сторону ветров северных румбов, т. е. формирование пляжных территорий и поддержание их в стабильном состоянии должно осуществляться системами волн, идущими главным образом от северных и северо-западных направлений (рис. 4).

Из классической трохоидальной теории волн известно, что полная энергия ветровой волны S связана с ее высотой h следующим выражением: $S = \frac{1}{8} gh^2$. При этом сама высота является функцией трех величин: скорости ветра W , продолжительности его действия в устойчивом направлении t и длины разгона волн D — соответствующего румба, км, т. е. дистанции, в пределах которой ветер воздействует на водную поверхность: $h = f(W, t, D)$.

На схеме видно, что длина разгона волн под ветрами северных румбов в Финском заливе, особенно при ветрах в его северо-западной четверти, в своем значении заметно выше по сравнению с ситуацией в условиях Рижского залива (рис. 4).

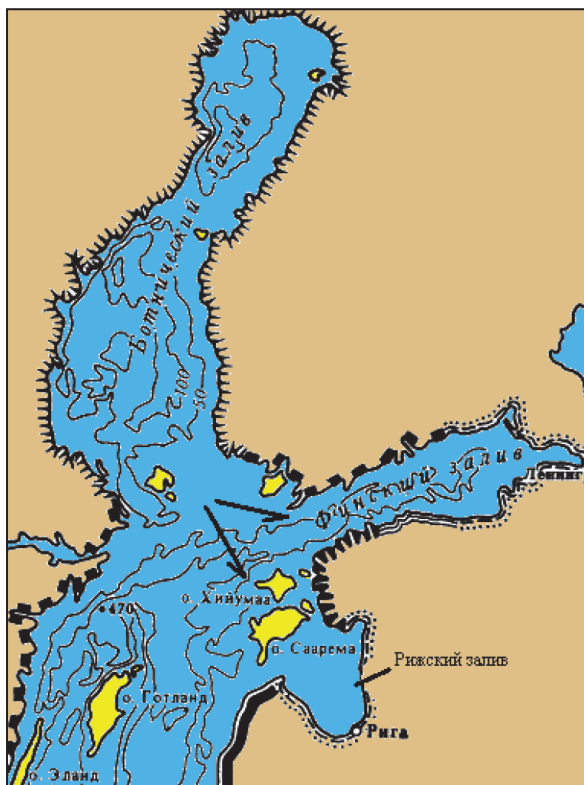


Рис. 4. Фрагмент изображения акватории Балтийского моря с заливами

На представленном плановом изображении обращает на себя внимание тот факт, что в Рижском заливе при схожих ветровых ситуациях дистанция волнового разгона D сокращается за счет блокировки свободного водного пространства двумя эстонскими островами: Хийумаа и Саарема. Таким образом, сообразно режимным характеристикам, побережье Финского залива должно выглядеть, казалось бы, предпочтительнее своего юго-западного аналога с точки зрения условий пляжеобразования. Но несмотря на это ситуация на латвийском побережье выглядит намного благоприятнее. Главная причина неблагоприятного состояния рассматриваемой части побережья Финского залива вряд ли связана с особенностями местного гидрологического режима, суть здесь несколько в ином. Вдоль значительной части береговой линии Финского залива параллельно ее контуру вырисовывается Лондонская отмель как один из основных, примыкающих к берегу элементов подводного рельефа. Это можно проследить по крупномасштабным навигационным картам района. Именно указанный элемент морского дна и должен блокировать ветровую волну со стороны открытого моря (рис. 5). На плане данный участок выделен бледно-голубым цветом.

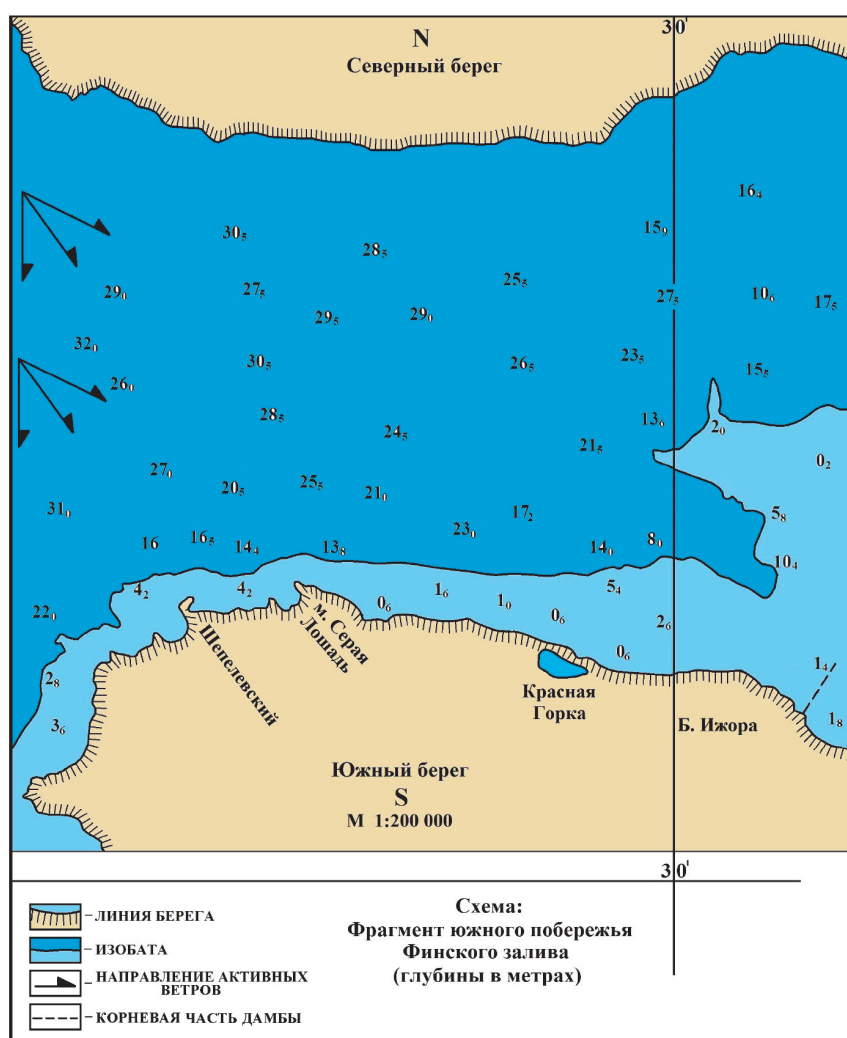


Рис. 5. Положение Лондонской отмели относительно линии берега в южной части побережья Финского залива

Изначально развитые штормовые волны Финского залива, преодолевая немалую дистанцию мелководья, с приближением к урезу, по мере контакта с мелким дном отмели, *утрачивают основную долю энергии за счет проявления «тормозящего» эффекта*. Таким образом, волна теряет свои пляжеобразующие свойства. Возникает некий парадокс: при избыточном скоплении песчаных масс у самого берега участки прилегающей суши залива испытывают резкий дефицит песчано-

го материала, т. е. существующее представление о том, что добыча песка в пределах Лондонской отмели якобы служит одной из весомых причин плохого состояния окружающих берегов, по нашему мнению, является ошибочным.

Таким образом, в процессе исследования данного природного феномена с экологической точки зрения можно отметить, что блокируемая Лондонской отмелью ветровая волна одновременно теряет способность осуществлять одну из важнейших функций по самоочистке (санированию) всей экосистемы и это должно оказывать отрицательное влияние на общее санитарное состояние большей части южного побережья.

Заключение (Conclusion)

Для регулирования процессов формирования пляжей в условиях южного побережья восточной части Финского залива необходимо изменить режим волноприбойного механизма на подходах к указанному берегу. Для этого необходимо предпринять действия по частичной ликвидации Лондонской отмели. Увеличение искусственным путем отметок дна (глубин) на 1–1,5 м с помощью дноуглубительных средств должно усилить пляжеобразующий волновой потенциал от западных, северных и северо-западных ветровых румбов [26], [27]. Подобная операция позволит открыть путь к берегу волнам открытого моря, активизируя выполнение ими экологических и рекреационных функций. Для реализации этого плана потребуется не одно десятилетие, если не более. Однако в перспективе мероприятие представляется оправданным и в дальнейшем должно быть учтено при разработке стратегических планов развития всего рассматриваемого объекта.

Частичная ликвидация Лондонской отмели с помощью дноуглубительной техники способна снять ряд вопросов не только природоохранного свойства. Добываемый песчаный материал может быть использован для подпитки соседствующих пляжных территорий, а также в строительной отрасли. Запасы данного месторождения оцениваются в количестве 41 млн 329 тыс. м³. Разведка месторождения насчитывает 174 скважины. Мощность верхней части залежи, представленной в основном мелкозернистыми фракциями песка, варьирует от 1,5 до 12 м. Подстилагся песчаная залежь супесями и суглинками. Учитывая грандиозность рекомендуемого проекта, но при этом его достаточно спорную актуальность для настоящего времени, целесообразно в ближайшие годы приступить к ускоренному формированию пляжных территорий искусственными методами с использованием специальной техники [28].

В начале 90-х гг. XX в. финскими инженерами была разработана малогабаритная рефулерная система, предназначенная для забора и транспортировки песчаных масс в прибрежной полосе, недоступной по глубинам даже для маломерных дноуглубительных средств. Такой тип рефулерных устройств может быть чрезвычайно востребован при решении ряда задач, связанных, например, с изменением конфигурации береговой линии, созданием искусственных бухт или наращиванием пляжей, обеспечивая при этом техническую возможность бесперебойной работы непосредственно в прибойной полосе даже в условиях непогоды.

Опыт искусственной отсыпки песчаной массы на пляже с целью поддержания оптимальных габаритов его надводной части был осуществлен на северном побережье Финского залива, в районе поселка Комарово в 1988 г. Размеры экспериментальной отсыпки объемом в 32250 м³ составляли в начальном виде 430 м в длину и 50 м в ширину. Данная операция выполнялась без учета приведенных в настоящей статье законов формирования пляжных территорий. В случае повторной реализации проектов подобного рода следует принять во внимание ранее изложенное, т. е. при осуществлении задуманного эксперимента на заранее согласованном участке берега следует определить наличие или отсутствие берегового вала. В случае наличия такового необходимо уточнить стадию его развития и дать оценку состояния прилегающей береговой полосы в целом. В местах отсутствия береговых валов следует осуществлять отсыпку вдоль уреза искусственного песчаного образования, имитирующего естественный береговой вал. Предлагаемая технология восстановления пляжной полосы является, с нашей точки зрения, наиболее соответствующей реальным природным процессам и достаточно экономичной. В условиях активного ветрового

режима созданный искусственным путем вал должен быть непременно вовлечен в естественные береговые процессы с постепенным восстановлением стандартного пляжного профиля [29], [30]. При формировании таким способом песчаной полосы, скорее всего, должна возникнуть необходимость в периодическом восстановлении искусственного вала. В данном случае на первый план выйдут технические возможности для проведения подобных операций с использованием малогабаритных рефулерных устройств нового типа.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Лонгинов В. В. Очерки литодинамики океана / В. В. Лонгинов. — М.: Наука, 1973. — 244 с.
2. Мунх-Петерсон. Движение наносов вдоль берегов безливных морей / Мунх-Петерсон // 4-я Гидрологическая конференция Прибалтийских стран. — Л.: Государственный гидрологический институт, 1934. — С. 30.
3. Зенкович В. П. Основы учения о развитии морских берегов / В. П. Зенкович. — М.: Изд. АН СССР, 1962. — 710 с.
4. Спиридонов М. А. Изменение береговой зоны восточной части Финского залива под воздействием природных и антропогенных факторов / М. А. [и др.] // Региональная геология и металлогения. — 2010. — № 41. — С. 107–118.
5. Филатов Н. Н. Водные ресурсы европейского севера России в условиях изменяющегося климата / Н. Н. Филатов [и др.], // Водные ресурсы суши в условиях изменяющегося климата: сборник статей. — СПб.: ООО «Издательство ЛЕМА», 2007. — С. 3–19.
6. Баском В. Волны и пляжи / В. Баском. — Л. Гидрометеиздат, 1966. — 280 с.
7. Кожухов И. В. Литодинамика, экология, морской микрорельеф: монография / И. В. Кожухов. — СПб.: Изд. ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова, 2018. — 156 с.
8. Кожухов И. В. Электронная инженерная гидрография и перспективы получения новых данных по морфологии и геоэкологии арктических морей / И. В. Кожухов, Е. Н. Колосков, Ю. Г. Фирсов // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2015. — № 4 (32). — С. 95–103.
9. Кожухов И. В. Порты и морские побережья в аспекте современных экологических проблем / И. В. Кожухов // Эксплуатация морского транспорта. — 2009. — № 3 (57). — С. 40–43.
10. Кожухов И. В. Системный подход к изучению потоков наносов в мелководной зоне морей для обеспечения нормального режима судоходства / И. В. Кожухов // Эксплуатация морского транспорта. — 2010. — № 3 (61). — С. 30–34.
11. Фирсов Ю. Г. Новые методы пространственной визуализации результатов инженерной батиметрической съемки / Ю. Г. Фирсов, И. В. Кожухов // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2014. — № 2 (24). — С. 17–23.
12. Евменов В. Ф. Опыт определения элементов морских волн радиолокационным методом / В. Ф. Евменов [и др.]. — Киев: Наукова думка, 1971. — 22 с.
13. Ретеюм А. Ю. Физико-географические исследования и системный подход / А. Ю. Ретеюм // Системные исследования. — 1972. — С. 90–109.
14. Тимофеев-Ресовский Н. В. Системный подход в экологии / Н. В. Тимофеев-Ресовский // Системные исследования. — 1970. — С. 114–134.
15. Григорьев А. Г. Новые данные по истории развития юго-восточной части Балтийского моря от позднеледникового до современности / А. Г. Григорьев [и др.] // Региональная геология и металлогения. — 2009. — № 40. — С. 103–114.
16. Зубенко Ф. С. Природная и антропогенная динамика берегов восточной части Финского залива / Ф. С. Зубенко // XIX Международная конференция “Современные проблемы изучения берегов”. Тезисы докладов. — СПб.: Изд. РАН, Санкт-Петербургский Научный центр, 1995. — С. 52–54.
17. Ингл Дж. Движение пляжных песков / Дж. Ингл. — Гидрометеиздат, 1971. — 226 с.
18. Леонтьев О. К. Геоморфология морских берегов и дна / О. К. Леонтьев. — Изд. МГУ, 1955. — 269 с.
19. Леонтьев И. О. Динамика прибойной зоны у песчаного аккумулятивного берега бесприливног моря: автореф. дис. физ.-мат. ... наук / И. О. Леонтьев. — М., 1993. — 39 с.
20. Орвику К. Современные берега / К. Орвику, О. Гранэ. — Таллин: Издательство АН Эстонии, 1992. — 422 с.

21. Спиридонов М. А. Методология, методы и главные результаты морского экологического (геоэкологического) патруля (МЭП) / М. А. Спиридонов [и др.] // Государственный доклад о состоянии окружающей среды Санкт-Петербурга и Ленинградской области в 1998г. — СПб.: Ленкомэкология, 2000. — Т. 2. — С. 216–236.
22. Сухачева Л. Л. Исследование изменчивости берега восточной части Финского залива на основе ретроспективного анализа данных аэро- и космических съемок / Л. Л. Сухачева, Е. И. Кильдюшевский // Сборник тезисов VII Международного форума «День Балтийского моря». — СПб., 2006. — С. 254–255.
23. Чахотин П. С. Периодические формы донного рельефа на шельфе Белого моря / П. С. Чахотин // Океанология. — 1976. — № 6. — С. 1063–1067.
24. Болдырев В. Л. Потоки песчаных наносов юго-восточной Балтики / В. Л. Болдырев, В. К. Гуделис, Р. Я. Кнапс // Исследования динамики рельефа морских побережий. — М.: Наука, 1979. — С.14–18.
25. Шепард Ф. Морская геология / Ф. Шепард. — Л.: Недра, 1969. — 462 с.
26. Daly C. J. On the morphological development of embayed beaches / C. J. Daly, C. Winter, K. R. Bryan // Geomorphology. — 2015. — Vol. 248. — Pp. 252–263. DOI: 10.1016/j.geomorph.2015.07.040.
27. Leont'yev I.O. The forecast of the coastal recession in the eastern Gulf of Finland for the twenty-first century / I. O. Leont'yev, D. V. Ryabchuk, A. Y. Sergeev, O. A. Kovaleva // Oceanology. — 2015. — Vol. 55. — Is. 3. — Pp. 434–440. DOI: 10.1134/S0001437015030108.
28. Bruun P. Off shore dredging F. influence on beach and bottom stability / P. Bruun // Dock and Harbour Authority. — 1971. — No. 605. — Pp. 241–247.
29. Leont'yev I. O. Modeling of storm-induced deformations of a sandy coast (based on the example of the eastern Gulf of Finland) / I. O. Leont'yev, D. V. Ryabchuk, A. Y. Sergeev // Oceanology. — 2015. — Vol. 55. — Is. 1. — Pp. 131–141. DOI: 10.1134/S000143701406006X.
30. Smyth T. A. G. Aeolian dynamics of beach scraped ridge and dyke structures / T. A. G. Smyth, P. A. Hesp // Coastal Engineering. — 2015. — Vol. 99. — Pp. 38–45. DOI: 10.1016/j.coastaleng.2015.02.011.

REFERENCES

1. Longinov, V. V. *Ocherki litodinamiki okeana*. M.: Nauka, 1973.
2. Munkh-Peterson. "Dvizhenie nanosov vdol' beregov bezlivnykh morei." *4-ya Gidrologicheskaya konferentsiya Pribaltiiskikh stran*. L.: Gosudarstvennyi gidrologicheskii institut, 1934. 30.
3. Zenkovich, V. P. *Osnovy ucheniya o razvitiі morskikh beregov*. M.: Izd. ANSSSR, 1962.
4. Spiridonov, M. A., D. V. Ryabchuk, K.K. Orviku, L.L. Sukhacheva, E.N. Nesterova, and V.A. Zhamoida. "Izmenenie beregovoi zony vostochnoi chasti Finskogo zaliva pod vozdеistviem prirodnkh i antropogennykh faktorov." *Regional'naya geologiya i metallogeniya* 41 (2010): 107–118.
5. Filatov, N. N., A. V. Litvinenko, L. E. Nazarova, Yu. A. Salo, A. Yu. Terzhevnik, L.A. Rukhovets, G.P. Astrakhantsev, A. V. Semenov, and V.N. Ozhigina. "Vodnye resursy evropeiskogo severa Rossii v usloviyakh izmenyayushchegosya klimata." *Vodnye resursy sushi v usloviyakh izmenyayushchegosya klimata: sbornik statei*. SPb.: OOO «Izdatel'stvo «LEMA», 2007. 3–19.
6. Baskom, V. *Volny i plyazhi*. L. Gidrometeoizdat, 1966.
7. Kozhukhov, I. V. *Litodinamika, ekologiya, morskoi mikrorel'ef: monografiya*. SPb.: Izd. GUMRF imeni admirala S.O. Makarova, 2018.
8. Kozhukhov, I. V., E. N. Koloskov, and Yu. G. Firsov. "Electronic engineering hydrography and the prospects of obtaining new results on the morphology and bottom environmental conditions of the arctic seas." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova* 4(32) (2015): 95–103.
9. Kozhukhov, I. V. "Porty i morskіe poberezh'ya v aspekte sovremennykh ekologicheskikh problem." *Ekspluatatsiya morskogo transporta* 3(57) (2009): 40–43.
10. Kozhukhov, I. V. "Systems approach to the study of flow of sediment in the shallow sea zone to ensure normal shipping." *Ekspluatatsiya morskogo transporta* 3(61) (2010): 30–34.
11. Firsov, Yu.G., and I. V. Kozhukhov. "The new three dimensional visualization techniques for bathymetric engineering survey." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova* 2(24) (2014): 17–23.
12. Evmenov, V. F., I. V. Kozhukhov, N. T. Nichiporenko, and G. D. Khulap. *Opyt opredeleniya elementov morskikh voln radiolokatsionnym metodom*. Kiev: Nauk. dumka, 1971.
13. Reteyum, A. Yu. "Fiziko-geograficheskie issledovaniya i sistemnyi podkhod." *Sistemnye issledovaniya* (1972): 90–109.

14. Timofeev-Resovskii, N. V. "Sistemnyi podkhod v ekologii." *Sistemnye issledovaniya* (1970): 114–134.
15. Grigor'ev, A. G., V. A. Zhamoida, M. A. Spiridonov, A. Yu. Sharapova, and V. V. Sivkov. "Novye dannye po istorii razvitiya yugo-vostochnoi chasti Baltiiskogo morya ot pozdnelednikov'ya do sovremennosti." *Regional'naya geologiya i metallogeniya* 40 (2009): 103–114.
16. Zubenko, F. S. "Prirodnaya i antropogennaya dinamika beregov vostochnoi chasti Finskogo zaliva." *XIX Mezhdunarodnaya konferentsiya "Sovremennye problemy izucheniya beregov". Tezisy dokladov.* SPb.: Izd. RAN, Sankt-Peterburgskii Nauchnyi tsentr, 1995. 52–54.
17. Ingl, Dzh. *Dvizhenie plyazhnykh peskov.* Gidrometeoizdat, 1971.
18. Leont'ev, O. K. *Geomorfologiya morskikh beregov i dna.* Izd. MGU, 1955.
19. Leont'ev, I. O. Dinamika priboinoi zony u peschanogo akkumulyativnogo berega besprilivnogo moray. Abstract of diss. M., 1993.
20. Orviku, K., and O. Grane. *Sovremennye berega.* Tallin: Izdatel'stvo AN Estonii, 1992.
21. Spiridonov, M. A., N. G. Medvedeva, V. T. Paka, and M. A. "Kholmyanskii. Metodologiya, metody i glavnye rezul'taty morskogo ekologicheskogo (geoekologicheskogo) patrulya (MEP)." *Gosudarstvennyi doklad o sostoyanii okruzhayushchei sredy Sankt-Peterburga i Leningradskoi oblasti v 1998g.* Vol.2. SPb.: Lenkomekologiya, 2000. 216–236.
22. Sukhacheva, L. L., and E. I. Kil'dyushevskii. "Issledovanie izmenchivosti berega vostochnoi chasti Finskogo zaliva na osnove retrospektivnogo analiza dannykh aero- i kosmicheskikh s'emok." *Sbornik tezisev VII Mezhdunarodnogo foruma "Den' Baltiiskogo morya".* SPb., 2006. 254–255.
23. Chakhotin, P. S. "Periodicheskie formy donnogo rel'efa na shel'fe Belogo moray." *Okeanologiya* 6 (1976): 1063–1067.
24. Boldyrev, V. L., V. K. Gudelis, and R. Ya. Knaps. "Potoki peschanykh nanosov yugo-vostochnoi Baltiki." *Issledovaniya dinamiki rel'efa morskikh poberezhii.* M.: Izd. Nauka, 1979. 14–18.
25. Shepard, F. *Morskaya geologiya.* L.: Nedra, 1969.
26. Daly, Christopher J., Christian Winter, and Karin R. Bryan. "On the morphological development of embayed beaches." *Geomorphology* 248 (2015): 252–263. DOI: 10.1016/j.geomorph.2015.07.040
27. Leont'yev, I. O., D. V. Ryabchuk, A.Y. Sergeev, and O. A. Kovaleva. "The forecast of coastal recession in the eastern gulf of Finland for the twenty-first century." *Oceanology* 55.3 (2015): 434–440. DOI: 10.1134/S0001437015030108.
28. Bruun, P. "Off shore dredging F. influence on beach and bottom stability." *Dock and Harbour Authority* 605 (1971): 241–247.
29. Leont'yev, I. O., D. V. Ryabchuk, and A. Yu Sergeev. "Modeling of storm-induced deformations of a sandy coast (based on the example of the eastern Gulf of Finland)." *Oceanology* 55.1 (2015): 131–141. DOI: 10.1134/S000143701406006X.
30. Smyth, Thomas AG, and Patrick A. Hesp. "Aeolian dynamics of beach scraped ridge and dyke structures." *Coastal Engineering* 99 (2015): 38–45. DOI: 10.1016/j.coastaleng.2015.02.011.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Кожухов Игорь Валентинович —
кандидат географических наук, доцент
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала
С. О. Макарова»
198035, Российская Федерация, Санкт-Петербург,
ул. Двинская 5/7
e-mail: pontida@mail.ru, kaf_bj@gumrf.ru
Спирidonov Михаил Александрович —
доктор геолого-минералогических наук, профессор
Всероссийский научно-исследовательский
геологический институт им. А.П. Карпинского
199106, Российская Федерация, Санкт-Петербург,
ВО, Средний пр., 72
e-mail: michail_spiridonov@vsegei.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Kozhuhov, Igor V. —
PhD, associate professor,
Admiral Makarov State University of Maritime
and Inland Shipping
5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg, 198035,
Russian Federation
e-mail: pontida@mail.ru, kaf_bj@gumrf.ru
Spiridonov, Mikhail A. —
Dr. of Geological and Mineralogical Sciences,
professor
A.P. Karpinsky Russian Geological Research Institute
72 Sredny Av., Vasilievsky Island, St. Petersburg,
199106, Russian Federation
e-mail: michail_spiridonov@vsegei.ru

Статья поступила в редакцию 18 ноября 2019 г.
Received: November 18, 2019.

SPECIAL NAVIGATIONAL SUPPORT AND ACCURACY OF BATHYMETRIC SURVEYS FOR DEEP-SEA MARINE GEOLOGICAL INVESTIGATIONS

Yu. G. Firsov

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

The current situation regarding the technical and methodical possibilities for sea bottom relief surveys aimed to support marine exploration work for hard-rock deposits investigations is examined in the study. The objective of this research is to analyse the accuracy of seafloor digital terrain models, created using modern technologies for deep sea bathymetric investigations with a multibeam echosounder. The alternatives of installing a multibeam echosounder on board of a scientific research vessel and underwater vehicles are discussed. A short historical retrospective overview of deep water seafloor relief investigations is presented. The new era for deep water precise bathymetric investigations came at the end of 20th century with the advent of the GPS system, multibeam echosounders, GIS and unmanned underwater vehicles. Marine exploration for prospecting deep-sea polymetallic sulfides produces the most strict requirements for their navigational support and bathymetric investigation accuracy. Special navigational support tasks and bathymetric surveys for deep-sea polymetallic sulfides study are discussed. The results of detailed sea bottom relief surveys using multibeam echosounders installed on remotely operated vehicles and autonomous operated vehicles are provided. New innovative technology using the acoustic navigation system with a long base line (Ramses) tightly coupled with an iXblue inertial navigation system (PHINS) on an Autonomous Underwater Vehicle is discussed. Such a system named "Sparse LBL system" reduces the number of transponders compared to other LBL systems. The information and recommendations on navigational support and detailed bathymetric surveys for marine geological investigations which can be useful for the Russian practice of deep-sea polymetallic sulfides investigations are also offered in the study.

Keywords: navigation support for the deep sea survey, bathymetric survey, multibeam echosounder, marine exploration work for hard-rock deposits, remotely operated vehicle, autonomous operated vehicle, technology and quality of sea floor investigations, deep-sea polymetallic sulfides.

For citation:

Firsov, Yury G. "Special navigational support and accuracy of bathymetric surveys for deep-sea marine geological investigations." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admiral S. O. Makarova* 11.6 (2019): 1070–1087. DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-6-1070-1087.

УДК 910.27

СПЕЦИАЛЬНОЕ НАВИГАЦИОННОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ И ТОЧНОСТЬ БАТИМЕТРИЧЕСКОЙ СЪЕМКИ ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ ГЛУБОКОВОДНЫХ ГЕОЛОГОРАЗВЕДОЧНЫХ РАБОТ

Ю. Г. Фирсов

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

В работе рассматриваются текущее состояние технологических и методических возможностей детального изучения подводного рельефа в целях обеспечения глубоководных морских геолого-разведочных работ. Задачами исследования является анализ точности создания цифровых моделей рельефа с использованием современных технологий съемки на больших глубинах с помощью многолучевых эхолотов. Рассматриваются варианты съемки рельефа дна при установке многолучевых эхолотов на надводном судне, а также на подводных аппаратах. Основным методом решения задач является анализ опубликованной информации по технологиям съемки рельефа на больших глубинах в целях обеспечения глубоководных мор-

ских геолого-разведочных работ. Кратко рассматривается историческая ретроспектива батиметрического изучения Мирового океана. Отмечается, что только во второй половине XX в. начали применять средства и методы для точного изучения подводного рельефа с поверхности моря. В этот период появились новые задачи, потребовавшие детального изучения рельефа дна на больших глубинах, связанные с первыми попытками проведения геологоразведочных работ на твердые полезные ископаемые дна Мирового океана. В 60–80 гг. XX в. проведение таких работ было существенно ограничено возможностями навигационного и батиметрического обеспечения и ситуация изменилась только в 90-х гг. XX в. с появлением глобальных навигационных спутниковых систем, многолучевых эхолотов, геоинформационных технологий, а также подводных роботов. В качестве примера наиболее строгих требований к навигационному и батиметрическому обеспечению приводятся морские геологоразведочные работы на глубоководные полиметаллические сульфиды, приуроченные к срединным океаническим хребтам и переходным зонам. Приведены точностные параметры съемки рельефа с поверхности моря, а также при использовании телеуправляемых необитаемых и автономных подводных аппаратов. На основе зарубежного опыта рассмотрены преимущества и недостатки проведения батиметрической съемки с использованием многолучевых эхолотов, устанавливаемых на телеуправляемых необитаемых подводных аппаратах и автономных необитаемых подводных аппаратах. Рассматривается инновационная технология использования подводной навигации с длинной базой при условии размещения на автономном необитаемом подводном аппарате интеллектуальной акустической системы RAMSES, интегрированной с инерциальной навигационной системой PHINS фирмы IxBlue с размещением на морском дне только одного специального маяка-ответчика CONOPUS. Даны рекомендации по использованию технологий навигационного обеспечения и детальной батиметрической съемки в целях проведения геологоразведочных работ на глубоководные полиметаллические сульфиды, которые могут быть полезны для российской практики проведения подобных работ.

Ключевые слова: навигационное обеспечение съемки рельефа дна, многолучевые эхолоты, морские геологоразведочные работы, твердые полезные ископаемые, телеуправляемые необитаемые подводные аппараты, автономные необитаемые подводные аппараты глубоководные полиметаллические сульфиды.

Для цитирования:

Фирсов Ю. Г. Специальное навигационное обеспечение и точность батиметрической съемки для решения задач глубоководных геологоразведочных работ / Ю. Г. Фирсов // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2019. — Т. 11. — № 6. — С. 1070–1087. DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-6-1070-1087.

Введение (Introduction)

Более 70,8 % поверхности Земного шара покрыто водной и скрыто от визуальных наблюдений, описаний и измерений. Рельеф дна отдельных глубоководных районов Мирового океана до сих пор остается мало изученным. На рубеже XVII и XVIII вв. сформировалась прикладная наука «гидрография», которую в первую очередь интересовали вопросы картирования береговой линии, прибрежного рельефа и главным образом навигационных опасностей, т. е. информация, необходимая для обеспечения безопасности мореплавания. Согласно базовому определению: «Морская гидрография — наука, изучающая рельеф и грунт морского дна в интересах мореплавания и использования природных ресурсов»¹. Изучение ресурсов Мирового океана стало особенно актуальным в конце XX в., решение этой задачи невозможно без детальной информации о рельефе, получаемой в результате батиметрической съемки. Батиметрия — существенная составная часть гидрографии — связана с наиболее детальным познанием подводного микрорельефа.

Исторически наметились два основных направления в изучении рельефа Мирового океана: гидрографическое и океанографическое. Оба из них занимаются изучением одного и того же объекта — рельефа дна, но имеют различные цели, решают разные задачи, используют особые методы работ и способы обобщения данных.

Главной особенностью подводного рельефа является сложность строения и многообразие форм и поверхностей, во многом отличающихся от наземного рельефа обликом, происхождением, расположением в пространстве и структурными соотношениями. В рельефе дна отражено взаимодействие эндогенных и экзогенных процессов, происходящих в этих средах и состоящих в обмене

¹ ГОСТ 23634–83. Морская навигация и морская гидрография. Термины и определения. М.: Государственный комитет СССР по стандартам, 1984. 13 с.

веществом и энергией [1], [2]. Данные о глубинах и формах рельефа дна явились опорными при интерпретации геолого-геофизических полей и многих океанологических параметров.

Современные исследования подводного рельефа связаны с использованием звука для измерения глубин и реализованные в однолучевых эхолотах (ОЛЭ). В исследовательских целях ОЛЭ впервые был использован в экспедиции на немецком научно-исследовательском судне (НИС) «Метеор» (1925–1927) в Атлантическом океане. Сразу была обнаружена расчлененность Срединно-Атлантического хребта, уточнены его контуры, определены очертания Капской и Ангольской котловин и впервые выявлены подводные горы. Эхолоты-самописцы, регистрирующие непрерывный профиль дна, появились в 40-х гг. XX в. и исследования перешли на качественно новый уровень — от изучения глубин к изучению форм рельефа. Профили дна дали представление об очертаниях и расчлененности форм рельефа, позволили получить глубину любой характерной точки профиля: вершины, подошвы, перегиба склона, отразив сложность строения подводного рельефа, разнообразие форм, характер границ, выявили типы и поверхностей. Оказалось, что плоские абиссальные равнины чередуются с холмистыми поверхностями, множество гор в одиночку, группами и цепями располагаются в пределах всех структур.

Отечественная батиметрическая съемка на больших глубинах в виде океанского промера началась после Второй мировой войны и была направлена главным образом на решение задач обороны страны. Съемки рельефа дна в научных целях в составе океанографических экспедиций, выполнявшихся организациями Академии наук (АН) СССР, а позднее, в 80-е гг. XX в., Министерством геологии СССР, осуществляются и теперь экспедициями Министерства природных ресурсов Российской Федерации (РФ). Первоначально батиметрические съемки на больших глубинах выполнялись исключительно с использованием ОЛЭ с широкой диаграммой направленности (угол луча до 15°), что не позволяло получать детальную информацию о топографии океанского дна. В этот период оформился геолого-геофизический комплекс исследований, включающий съемку рельефа дна ОЛЭ, фотографирование и телесъемку дна, непрерывное сейсмическое профилирование, гравитационные и магнитометрические измерения, а также геологическое опробование [3]. Комплексная интерпретация данных позволила определить характер и направленность рельефообразующих процессов и генезис форм рельефа дна. С начала 70-х гг. XX в. спутниковые радионавигационные системы (СРНС) уже позволяли определять координаты судов на всей площади Мирового океана с точностью в несколько сотен метров, а в 90-е гг. XX в. с вводом в действие глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС) GPS/ГЛОНАСС вопрос высокоточного позиционирования на поверхности моря был окончательно решен.

В 80-е гг. XX в. отечественные НИС АН начали оснащаться МЛЭ с узкими лучами. При этом детальность и производительность изучения рельефа дна на больших глубинах радикально повысилась. В течение непродолжительного периода времени было обнаружено множество форм рельефа различного облика и размера, определены характерные черты их морфологии и закономерности расположения, выявлена общая орографическая схема строения дна Мирового океана и установлен характер связи рельефа дна с основными геолого-геофизическими и другими полями океана. В этот период были завершены открытия и исследования краевых глубоководных желобов, которые начали проводиться в конце XIX в. В Мировом океане насчитывается 37 таких желобов (больше всего в Тихом океане), максимальные глубины которых определены. Подводные горы представляют одну из характерных и широко распространенных форм рельефа. Горы найдены во всех морфологических провинциях дна Мирового океана: в котловинах, на хребтах и поднятиях, где они образуют цепи и группы, а также встречаются отдельно. Площади холмистых участков дна особенно велики в Тихом океане, где выделено несколько типов холмов. На дне котловин обнаружены подводные долины, по протяженности и сложности сопоставимые с крупными речными системами суши. Все эти достижения были бы невозможны без международного сотрудничества в вопросах изучения рельефа дна, которое началось с создания Генеральной международной батиметрической карты океанов — ГЕБКО.

В XXI в. ГЕБКО стала ведущей программой международного картографирования океанского дна. В 2003 г. вышло 6-е издание карты рельефа дна Мирового океана в виде электронного Атласа ГЕБКО, которое ознаменовало переход от ручного составления батиметрических карт к цифровым моделям рельефа (ЦМР). В 2009 г. была представлена новая ЦМР с размером ячейки 30 дуговых секунд с наименованием «GEBCO-08», а в 2015 г. проект был актуализирован с наименованием «GEBCO-2014», детальное описание которого представлено в работе [4]. Батиметрическая модель «GEBCO-2019» является новой реализацией «GEBCO-14» с размером ячейки 15 дуговых секунд и включает также ряд новых региональных батиметрических моделей¹.

В настоящее время (2019 г.) ведется работа над новым проектом «GEBCO Seabed 2030», имеющим целью создать к 2030 г. детальную батиметрическую модель Мирового океана с регулярной сеткой 100 м на основе использования новых гидрографических технологий. Подробности об этом проекте можно найти на сайте².

Основная часть (Main Part)

В конце 80-х гг. XX в. с появления ГНСС, персональных компьютеров и геоинформационных технологий, а также МЛЭ, осуществляющих площадную съемку дна с НИС, картографирование подводного рельефа перешло на качественно новый уровень. МЛЭ являются составной частью аппаратно-программных комплексов, вычисляющих глубины и их координаты на дне с использованием системы гидроакустических лучей [5]. Данные обрабатываются по ходу съемки и могут быть представлены в цифровой и графической форме в масштабе реального времени. Обработка съемки и построение карт происходят непосредственно в экспедициях. Точность измерения глубин на плоском дне составляет 0,1 %, уменьшаясь на расчлененных участках до 0,25 % от глубины. В комплексе МЛЭ используется специализированное программное обеспечение для сбора, визуализации и контроля поступающих данных в реальном времени, а также постобработки данных и построения карт. Затем, на основании полученных измерений путем интерполяции отметок глубин, рассчитываются значения глубин в узлах регулярной сетки (грид). При этом формируется ЦМР, позволяющая создавать двухмерные (2D) и трехмерные (3D) виртуальные изображения рельефа дна на экране компьютера с использованием специального программного обеспечения. Судовой комплекс на базе МЛЭ позволяет в ходе экспедиции видеть изображения рельефа по полю обзора в реальном масштабе времени, а затем в результате окончательной обработки данных съемки переходить к созданию цифровых батиметрических карт.

Современные цифровые батиметрические карты создаются на основе ЦМР с использованием регулярной сетки глубин (грида). Размер ячейки регулярной сетки составляет, как правило, 0,2 % глубины [6]. Таким образом, при съемке с поверхности моря на глубинах 2000 м для получения детальной модели рельефа размер ячейки не должен превышать 40 м, что позволяет отображать поверхность с сечением 20–40 м и создавать батиметрическую карту в масштабах не крупнее 1 : 50 000. С помощью МЛЭ, установленных на НИС, было выявлено морфологическое разнообразие форм рельефа и сложное строение морфоструктур дна. Удалось обнаружить и отразить на картах формы рельефа, которые было невозможно выявить с помощью обычных ОЛЭ, а именно: скопления грязевых вулканов, крупных гряд, ячеистый характер поверхности дна. На вершинах подводных вулканов обнаружены кратеры сложных очертаний, а на их склонах — многочисленные сателлитные постройки. На дне рифтов были обнаружены кулисообразно расположенные узкие впадины и гряды, а также вулканические постройки. Наиболее сложным оказался рельеф в области пересечения рифтов и разломов, где располагаются определенные комплексы структурных форм рельефа: угловые поднятия, нодальные впадины, приразломные хребты и депрессии.

Возможности изучения малых форм рельефа и типов поверхности дна увеличились с использованием глубоководных обитаемых аппаратов (ГООА). Были выделены типы поверхностей,

¹ GEBCO 2019 Grid. [Электронный ресурс]. Режим доступа: URL https://www.gebco.net/data_and_products/gridded_bathymetry_data/gebco_2019/gebco_2019_info.html.

² GEBCO Seabed 2030. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://seabed2030.gebco.net>.

сформированные различными рельефообразующими факторами: вулканические образования в рифтовых долинах, подушечные, шаровые, органые, плиточные типы лавовых покровов, типы коралловых и хемогенных построек на подводных горах, различные типы поверхностей, образованные на дне котловин конкрециями и корками различного состава, бентосными организмами, движением придонных вод. Современные средства батиметрических исследований обеспечивают развитие новых направлений в изучении рельефа дна — подводного ландшафтоведения и морской экологии [7]. С использованием МЛЭ, ГБО на ГОА, а также их установкой на телеуправляемые необитаемые подводные аппараты (ТНПА) и автономные необитаемые подводные аппараты (АНПА) изменилась методика и организация работ. Исследования, как правило, проводят на полигонах. Работа начинается с рекогносцировочной съемки с МЛЭ, сопровождаемой геолого-геофизической съемкой с борта НИС. На основе полученных батиметрических карт масштаба 1: 50 000 намечают область, где дно обследуется с помощью МЛЭ на ТНПА, затем выбирают места визуальных наблюдений и опробований с помощью ГОА и / или ТНПА. В настоящее время очередной исторический период изучения глубоководного рельефа близится к завершению. На смену ему в ближайшие годы придет новый этап, связанный с высокоточным изучением рельефа дна в глобальном масштабе, а также детальным изучением на локальных участках дна в целях разведки и добычи глубоководных твердых полезных ископаемых (ТПИ).

Накопленные мировой наукой, в том числе отечественными геологами, знания о месторождениях минеральных ресурсов Мирового океана позволяют делать выводы об экономической и стратегической актуальности создания в настоящее время морской горнодобывающей отрасли. Ведущие страны мира, такие как Франция, Германия, Япония, КНР, Южной Кореи, Россия и другие, рассматривают доступность к минеральному сырью как важный фактор своего дальнейшего экономического развития. Увеличивающийся в мире дефицит многих видов стратегического минерального сырья, истощение запасов эксплуатируемых месторождений полезных ископаемых и резкое усложнение горно-геологических условий их добычи на континентальной суше заставляют искать нетрадиционные источники и способы добычи минерально-сырьевых ресурсов. Ресурсной базой, способной возместить в недалеком будущем дефицит минерального сырья, являются полезные ископаемые не только континентального шельфа, но и дна глубоководных районов Мирового океана.

Основными видами ТПИ Мирового океана являются: железомарганцевые конкреции (Polymetallic Nodules), кобальтоносные железомарганцевые корки (Ferromanganese Crusts), глубоководные полиметаллические сульфиды (Polymetallic Sulphides). К числу значимых ТПИ океана могут быть также отнесены океанические фосфориты и газогидраты. Последние имеют все основания быть включенными в эту группу, так как залегают в поверхностном слое донных отложений океана в виде льдоподобных твердых агрегатов и в таком виде могут быть обнаружены и подняты на поверхность. Месторождения железомарганцевых конкреций (ЖМК), как правило, приурочены практически ко всем абиссальным структурно-тектоническим зонам Мирового океана в интервале ~1–6 км [8]. Кобальтоносные железомарганцевые корки (КМК), как правило, приурочены к подводным горам вулканического происхождения (чаще всего, к гайотам). Глубина распространения КМК — 1400–1700 м. Область развития КМК приурочена к околовершинным частям склона. В случаях, если вершины подводных гор свободны от осадков, на них также возможно распространение КМК. Распространение глубоководных полиметаллических сульфидов (ГПС) связано со срединно-океаническими хребтами (СОХ) и островными дугами на глубинах ~1,5–4,5 км [8].

Права на проведение поиска и разведки, а также добычи в международных районах морского дна предоставляются Международным органом по морскому дну ООН (International Seabed Authority — ISA), представляющим собой организацию, посредством которой государства — участники Конвенции организуют и контролируют деятельность в целях распоряжения ресурсами Района. Международный орган по морскому дну (МОМД) является автономной международной организацией, учрежденной в соответствии с «Конвенцией по морскому

праву 1982 года» Организации Объединенных Наций (ООН). Для проведения глубоководных геологоразведочных работ (ГРР) на морские руды национальная организация должна заключить контракт с МОМД на проведение поисков и разведки соответствующих полезных ископаемых, согласно установленным правилам.

В результате почти сорокалетних планомерных ГРР по поиску ТПИ Россия получила исключительные права на разведку и освоение трех видов океанических полезных ископаемых сроком на 15 лет, в следующих районах: на ЖМК в провинции Кларион-Клиппертон (Тихий океан), на ГПС на Срединно-Атлантический хребте (САХ), а также на КМК в районе Магеллановых гор (Тихий океан). Освоение минеральных ресурсов Мирового океана, создание условий для их разведки и добычи в международных районах морского дна являются одними из долгосрочных задач национальной политики, определенных следующими документами: «Морская доктрина на период до 2020 года» и «Стратегия развития морской деятельности Российской Федерации до 2030 года».

Навигационно-гидрографическое обеспечение (НГО) поиска и разведки глубоководных ТПИ является наиболее технологически сложным видом гидрографических работ, поскольку связано с необходимостью детального изучения рельефа дна и высокоточного определения положения объектов вблизи морского дна на больших глубинах. Главной особенностью НГО поиска и разведки ТПИ является необходимость комплексного использования средств ГНСС и гидроакустических навигационных систем (ГАНС) для позиционирования НИС, ТНПА, АНПА, а также ГАО. Для эффективного проведения поиска и разведки ТПИ и безопасной эксплуатации подводных аппаратов необходима детальная информация о рельефе дна. Другой особенностью НГО поиска и разведки ТПИ является локальность района работ, их сугубо научный характер и уникальность используемых средств и методов. С точки зрения технологии НГО наиболее сложными объектами для изучения рельефа дна, несомненно, являются геолого-тектонически сложные СОХ с их рифтовыми зонами, по сравнению с которыми абиссальные равнины и подводные горы (включая гайоты) имеют более простую морфологию. Исходя из этого в дальнейшем будем рассматривать именно НГО поиска и разведки ГПС на основе зарубежного и российского опыта работы в рифтовых зонах САХ.

Разведочный район, в пределах которого РФ получила исключительное право на ведение разведочных работ на ГПС, расположен в осевой зоне САХ в интервале широт: 12°48'36" и 20°54'36" с. ш. Район включает сто разведочных блоков размером 10 × 10 км и площадью, 100 км² каждый [8]. В соответствии с контрактом с МОМД, основными задачами на первом этапе (2012–2018 гг.) служило выявление первоочередных перспективных районов для проведения более детальных разведочных работ. Задачами второго этапа (2019–2023 гг.) станет выявление конкретных рудных объектов и оценка потенциальных ресурсов слагающих их руд. На третьем этапе (2024–2027 гг.) планируется разведка промышленно значимых рудных объектов с подсчетом запасов слагающих их руд, окончательным обозначением добычного района. Разведочные работы проводятся с НИС «Профессор Логачев» АО «Полярная морская геологоразведочная экспедиция» (ПМГРЭ). На втором этапе на НИС «Профессор Логачев» для выявления конкретных рудных объектов и оценки потенциальных ресурсов в составе НГО планируется решение следующих задач:

- площадная съемка дна с НИС с помощью МЛЭ ATLAS Hydrosweep MD/30 (320 лучей: 1×1°, с частотой акустического сигнала: 24–30 кГц)¹;
- детальная площадная съемка дна с ТНПА «Sperre SUB-fighter 30K» (Норвегия) с МЛЭ SeaBat 7125;
- позиционирование ТНПА Sperre SUB-fighter по ГАНС HiRAP-101².

Примечание. ГАНС HiRAP-101 (фирма «Kongsberg», Норвегия) в режиме работы в ультракороткой базе (УКБ) обеспечивает точностью привязки ТНПА: 0,2 % от глубины. Возможен режим работы в длинной базе (ДБ) с донными

¹ ATLAS Hydrosweep MD/30. [Электронный ресурс]. Режим доступа http://209.240.133.120/media/pdf/product_resources/74.pdf.

² ROV SUB-fighter 30K. «Sperre SUB-fighter 30K». [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://sperre-as.com/portfolio/sub-fighter-30k>.

маяками-ответчиками (МО), установленными на морском дне. Детальная информация по технической оснащенности НИС «Профессор Логачев» приведена на сайте АО ПМГРЭ¹.

Указанные задачи НГО являются новыми для российской практики поиска и разведки ГПС. В этой связи целесообразно рассмотреть зарубежный опыт выполнения НГО поиска и разведки ГПС. Первые крупнообъемные пробы ГПС на САХ были подняты на поверхность в 1985 г. С тех пор на САХ различными государствами регулярно выполнялись исследовательские работы на ГПС и были обнаружены многочисленные новые гидротермальные поля. При этом на иностранных НИС для НГО использовались исключительно МЛЭ. Опыт французской компании IFREMER наглядно показал, что задачи поиска и разведки ГПС не позволяли ограничиться изучением рельефа дна рифтовых зон СОХ при использовании МЛЭ с поверхности моря. Глубина моря играет решающее значение для детальной съемки рельефа.

Французский заявочный участок на САХ с гидротермальными полями TAG, Snake Pit находится на глубинах 3200–3700 м. Расположенный южнее российский участок имеет глубины 1900–5100 м. Положение российского и французского заявочных участков на САХ представлено на рис. 1. В 2005 г. начался новый этап исследований САХ — международный проект MOMAR (Monitoring of the Mid-Atlantic Ridge), связанный с мониторингом рельефа дна на ранее найденных локальных гидротермальных полях. На этих полях, получивших названия «Menez Gwen», «Salaanha», «Rainbow» и «Lucky Strike» и расположенных на глубинах 1700–3200 м, были отработаны методы съемки и мониторинга рельефа. Задачи мониторинга предъявляют высокие требования к детальности выполнения съемки рельефа, которую невозможно было выполнить, используя МЛЭ с поверхности моря. Для обеспечения мониторинга для съемки рельефа впервые был использован МЛЭ, установленный на ТНПА (ROV — Remotely Operated Vehicle).

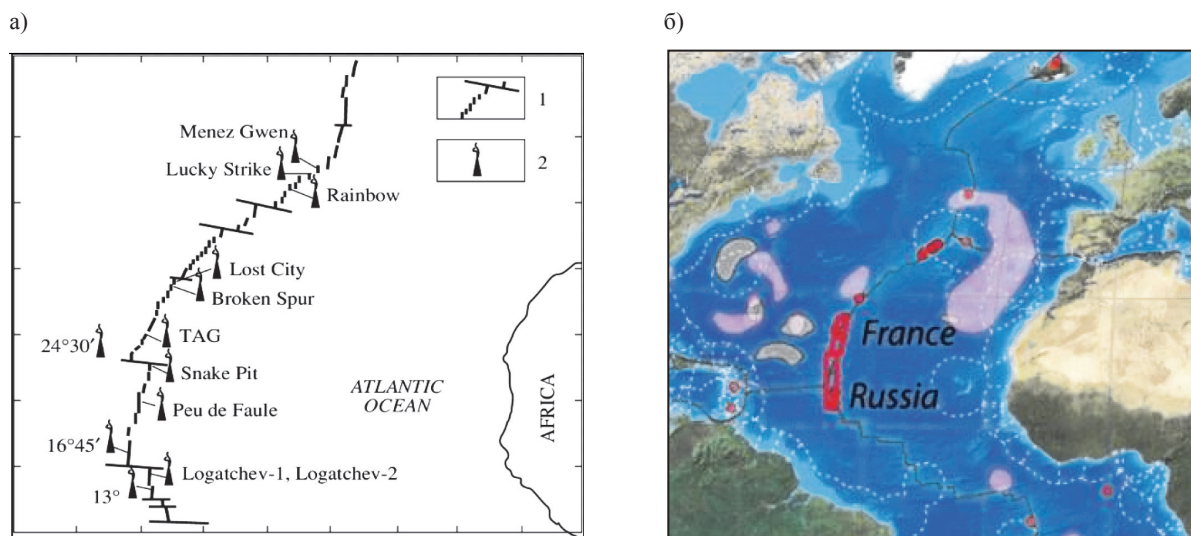


Рис. 1. Расположение российского и французского участков:
а — схема наименования участков; б — карта Срединно-Атлантического хребта

На рис. 2 приведена 3D батиметрическая модель района САХ, созданная по проекту MOMAR на основе площадной съемки с поверхности с помощью МЛЭ и врезками, демонстрирующими детальную модель рельефа по результатам съемки с ТНПА для полей: «А» (Menez Gwen), «В» (Lucky Strike), «С» (Rainbow).

Наиболее полные результаты мониторинга рельефа были опубликованы для гидротермального поля «Lucky Strike», расположенного на САХ, между параллелями 37°03 N and 37°37 N, в 40 км от Азорских островов. Положение гидротермального поля «Lucky Strike» приведено на рис. 3, а, и детальная топография рудных сульфидных построек с присвоенными им именами по результатам съемки ТНПА показана на рис. 3, б.

¹ Исследования по проблеме глубоководных полиметаллических сульфидов (ГПС) в осевой зоне Срединно-Атлантического хребта. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.pmge.ru/index.php?id=665&lang=RUS>.

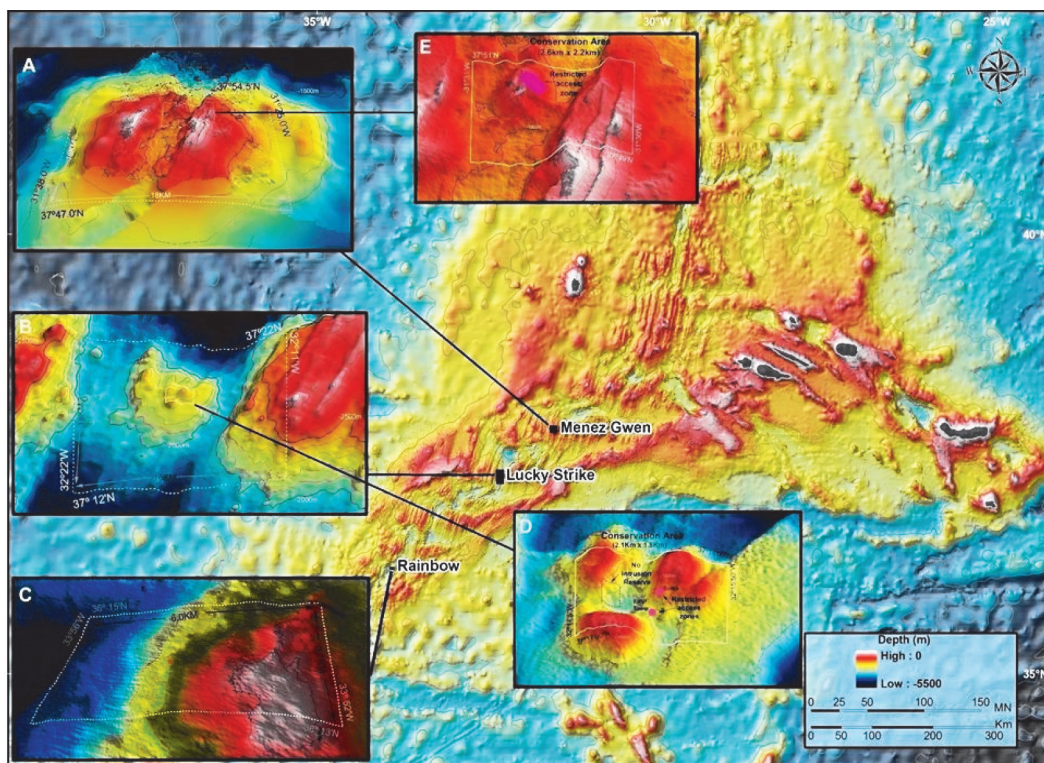


Рис. 2. Батиметрическая модель участка Срединно-Атлантического хребта, созданная по проекту MOMAR: съемки рельефа с НИС и ТНПА (гидротермальные поля: «А», «В», «С»)

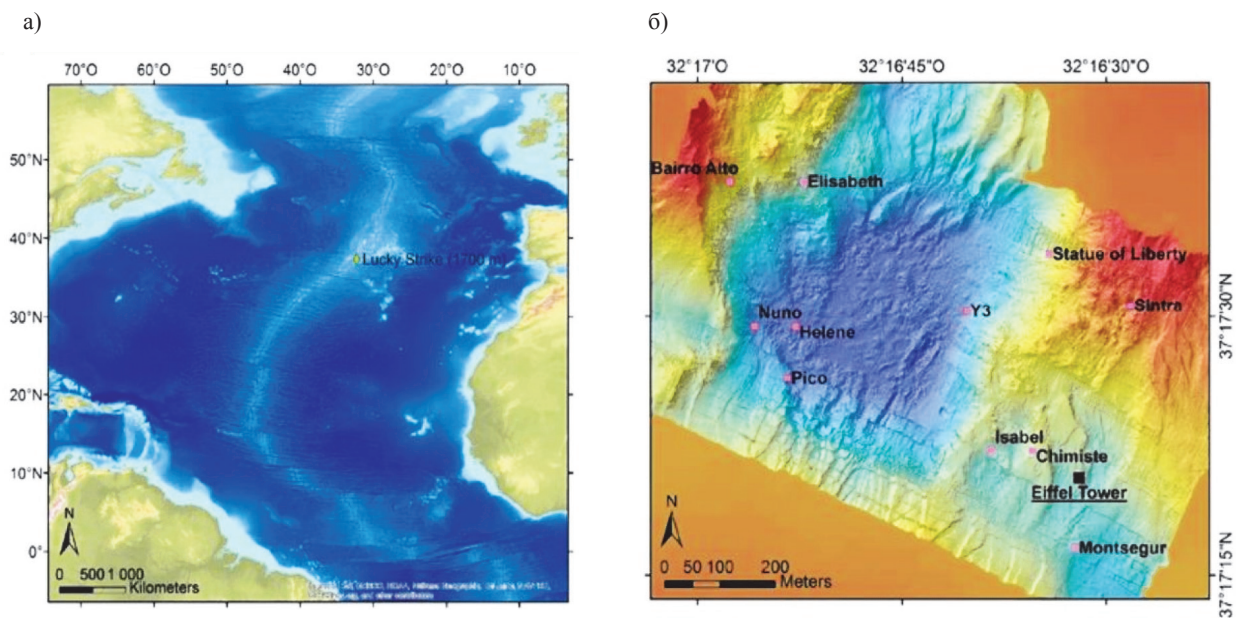


Рис. 3. Гидротермальное поле «Lucky Strike»:
а — положение гидротермального поля «Lucky Strike» на САХ;
б — детальная топография гидротермального поля «Lucky Strike» по результатам съемки с ТНПА

Работы выполнялись в рейсе «SERPENTINE» (2007 г.) на НИС «Pourquoi-Pas», принадлежащем французской компании по изучению Мирового океана IFREMER, оборудованном МЛЭ RESON 7150 (частоты 12/24 кГц). На ТНПА (ROV) Victor 6000 был установлен МЛЭ RESON 7125 (частота

400 кГц), используемый для детальной съемки рельефа гидротермального поля «Lucky Strike». В период рейса НИС «Pourquoi-pas» выполнил также детальную съемку на российских гидротермальных полях: «Ашадзе-1», «Ашадзе-2», «Логачев 1» и «Логачев-2» (см. рис. 1, а). Подробные сведения по научному оснащению НИС «Pourquoi-Pas» приведены на сайте компании IFREMER¹.

Глубина гидротермального поля «Lucky Strike» составляет в среднем 1700 м и при съемке МЛЭ RESON 7125 размер ячейки регулярной сетки равен 35 м (2 % от глубины). Гидротермальное поле «Lucky Strike» протяженностью до 1 км, расположенное в зоне разлома САХ (скорость спрединга до 22 мм в год), показано на батиметрической карте, представленной на рис. 4 (батиметрическая карта В). Ширина рифтовой долины составляет 10–15 км, высота бортов — до 1000 м. Расположенный на днище рифтовой долины вулкан, к которому приурочено рудное поле, имеет протяженность по оси долины 13 км, поперек долины 7 км и высоту 400 м. Батиметрический профиль (рис. 4 поперечное сечение С), представленный на рис. 4 (батиметрическая карта В — section C), наглядно представляет поперечное сечение рифтовой долины. В рамке на рис. 4 (батиметрическая карта В) представлен район детальной съемки рельефа с использованием МЛЭ RESON 7125, установленного на ТНПА «Victor 6000», который показан на рис. 5.

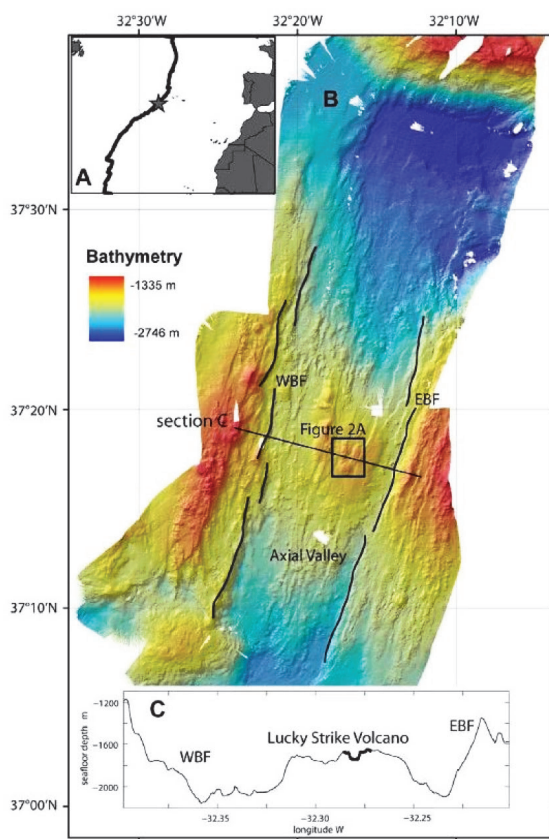


Рис. 4. Батиметрическая карта рифтовой долины САХ с гидротермальным полем «Lucky Strike»

Условные обозначения: А — обзорная карта САХ;
В — батиметрическая карта, составленная по данным площадной съемки с НИС;
С — поперечное сечение рифтовой долины

На локальном участке гидротермального поля при высоте ТНПА над дном менее 100 м обеспечивалась точность получения глубины МЛЭ RESON 7125 в среднем 0,2 % от высоты. Плановое положение ТНПА определялось относительно НИС при использовании ГАНС в режиме ультрако-

¹ French oceanographic fleet operated by Ifremer. Ships and state-of-the-art instruments to explore the oceans Pourquoi pas? [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.flotteoceanographique.fr/La-flotte/Navires/Navires-hauturiers/Pourquoi-pas>. (дата обращения: 1.08.2019).

роткой базой (УКБ) с точностью 1% от глубины моря ($\approx \pm 17$ м). Для повышения точности планового положения использовался режим счисления, корректируемого по ГНСС при каждом всплытии ТНПА, которое осуществлялось с интервалом 2 ч. При этом дрейф автономной системы счисления ТНПА оценивался не более 10 м за 2 ч.

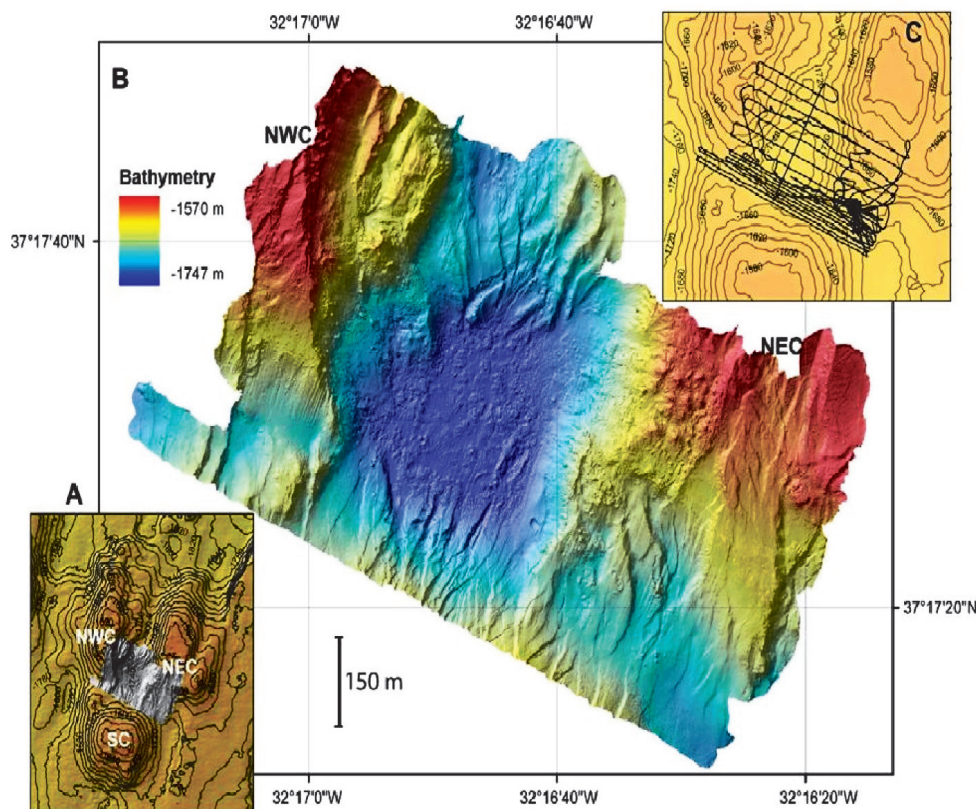


Рис. 5. Батиметрическая съемка гидротермального поля «Lucky Strike» с использованием ТНПА «Victor 6000»: обзорная карта-схема района — фрагмент А; детальная топография гидротермального поля «Lucky Strike», по данным съемки с ТНПА «Victor 6000» — фрагмент В; схема галсов батиметрической съемки с использованием ТНПА «Victor 6000» — фрагмент С

Полигон для съемки рельефа с ТНПА находился между вершинами трех вулканов, занимая площадь 1200×800 м, как показано на рис. 5 (фрагменты В и С). Галсы съемки с азимутом 110° были проложены через 20 м (8 галсов) при высоте ТНПА над дном 8 м и через 70 м (семь галсов) при высоте над дном 30 м (см. рис. 5 фрагмент С). Таким образом, было обеспечено горизонтальное разрешение 0,4 м для восьми галсов (высота 20 м) и 1,5 м для остальных семи часов с высотой над дном 8 м. В результате была построена регулярная сетка глубин с ячейкой размером 0,5 м, представленный на рис. 5 фрагмент В. Подробные сведения по результатам детального изучения гидротермального поля «Lucky Strike» в 2005–2007 гг. представлены в работе [9].

В 2008–2010 гг. комплексные исследования гидротермального поля «Lucky Strike», включающие мониторинг изменения рельефа, проводились в рамках уникального проекта «MoMAR-D». Детальная съемка рельефа была продолжена с ТНПА «Victor 6000», а затем с использованием АНПА «Aster-X». Применение АНПА позволило существенно сократить время исследований, освобождая НИС для решения других задач. В процесс исследований компания «IFREMER» продолжила использовать свой ГОА «Nautilie» для визуальных наблюдений гидротермальных построек и биоты. При использовании с МЛЭ ЕМ 2000 (200 кГц) высота АНПА «Aster-X» над рельефом составляла, как правило, не более 70 м. При этом удавалось создавать ЦМР регулярную сетку с размером ячейки 0,25–2,0 м (в зависимости от высоты АНПА над дном).

Детальная съемка рельефа с ТНПА «Victor 6000» и АНПА «Aster-X» покрыла дополнительно 35 км² в районе вулкана в центральной части рифтовой долины. В итоге общая площадь детальной съемки гидротермального поля «Lucky Strike» составила 190 км², что до настоящего времени является одной из самых больших площадей детальной «микробатиметрической» съемки (Microbathymetry Survey), выполненной в зонах спрединга срединно-океанических хребтов. В результате работ по проектам «MOMAR-08» и «Bathyluck-09» удалось уточнить рельеф и положение отдельных гидротермальных построек поля. На рис. 6 представлена детальная топография дна и положение рудных сульфидных построек на гидротермальном поле «Lucky Strike».

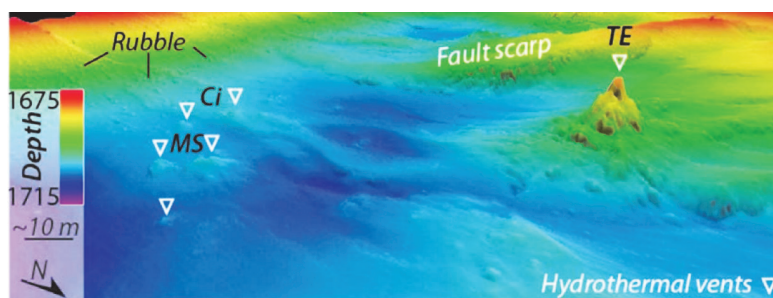


Рис. 6. Детальное трехмерное представление положения рудных построек на поле «Lucky Strike»

Детальное описание процесса мониторинга рельефа дна на гидротермальном поле «Lucky Strike», по проектам «MOMAR-08» и «Bathyluck-09» приведено в работе [10]. В дальнейшем результаты мониторинга рельефа дна гидротермального поля «Lucky Strike» были использованы для исследований высокоточного подводного позиционирования объектов (ТНПА, АНПА) по ГАНС ДБ, выполняемых в качестве подготовки к этапу промышленной добычи ГПС. Применение АНПА для обеспечения НГО разнообразных видов морской деятельности, требующих высокоточного определения положения подводных объектов и съемки рельефа дна, является в настоящее время ведущим направлением морской геологии и океанографии. Компания «IFREMER» продолжила использование АНПА «Aster-X» для реализации различных проектов, в том числе на ГПС (адрес сайта: <http://flotte.ifremer.fr/fleet/Presentation-of-the-fleet/Underwater-systems/AUV-Aster-x>).

Американская некоммерческая организация по исследованию Мирового океана MBARI (The Monterey Bay Aquarium Research Institute) разработала свои варианты АНПА, оснащенных набором датчиков для картографирования дна на глубинах до 6000 м со скоростью 3,5 уз и автономностью более 20 ч. В состав датчиков входит МЛЭ Reson-7125, Edgetech FSDW (профилограф, ГБО)¹. Свои варианты АНПА для картографирования дна разработала также немецкая компания GEOMAR. По опубликованным сведениям, АНПА «Abyss» используется для детальной съемки рельефа на в районах залегания ЖМК. Данный АНПА, укомплектованный видеосистемой, может использоваться для регистрации информации с целью автоматического расчета объема конкрецией на базе новой технологии, основанной на подсчете количества конкрецией по площади при учете корреляции с типом рельефа.

Обсуждение (Discussion)

В течение последнего десятилетия интенсивно развиваются гидрографические информационные технологии, основанные на анализе акустических сигналов МЛЭ с целью дистанционного анализа донного грунта и распознавания объектов в водной толще. До недавнего времени такие технологии, реализованные в промышленных гидрографических пакетах CARIS TELEDYNE, Qimera/Fledermaus QPS, HYDRACK и др., использовались, как правило, только в инженерной гидрографии при выполнении мелководных съемок.

¹ Vehicle Technology. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.mbari.org/technology/emerging-current-tools/vehicle-technology/> (дата обращения: 1.08.2019).

Гидрографический пакет QINSy (QPS) [11], [12] позволяет обеспечивать выполнение съемки рельефа дна с помощью МЛЭ, установленной на ТНПА. Аналогичные возможности имеют пакеты EIVA NaviSuit. Применение программного пакета Fledermause [7], содержащего также модуль «Vessel Manager», позволяет осуществлять объемную визуализацию «объектов»: НИС и ТНПА на фоне ЦМР дна в реальном масштабе времени. Это открывает новые возможности активного управления объектами и решения многих дополнительных задач НГО. Использование микробатиметрической съемки с использованием ТНПА позволит применить технологии дистанционного анализа донного грунта и распознавания объектов в водной толще при НГО ТПИ. Одно из первых описаний применения указанных технологий при НГО содержится в работе [13].

Применение АНПА по сравнению с ТНПА имеет преимущества в производительности выполнения микробатиметрической съемки рельефа. Скорость хода ТНПА составляет, как правило, 0,5–1,5 уз, а у АНПА скорость хода более 4 уз. Однако высота хода АНПА над дном, как правило, значительно больше, чем у ТНПА, что связано с обеспечением его безопасности. Поэтому детальность съемки рельефа с помощью МЛЭ, установленном на ТНПА, выше, чем у АНПА. ЦМР, полученные в результате микробатиметрической съемки рельефа с помощью МЛЭ, установленного на ТНПА, может иметь размер ячейки 0,2–0,5 м, а для АНПА размер ячейки — от 1,0 м и более. Вместе с тем применение ТНПА требует наличия на НИС системы динамической стабилизации для обеспечения удержания судна в заданной точке и движения по проектному галсу на малых ходах. Практика показывает, что применение АНПА для разведочной микробатиметрической съемки с помощью МЛЭ является эффективным на больших глубинах с выровненным рельефом (ЖМК на абиссальных равнинах). На локальных участках со сложно расчлененным рельефом и глубинами до 3000 м преимущество имеют ТНПА. Позиционирование ТНПА осуществляется по ГАНС УКБ, обеспечивая относительную точность планового положения 0,2 % от глубины [14]. Это, в частности, подтверждает опыт разведочных работ на ГПС, полученный компанией «Nautilus Minerals Inc» на участке «Salwara 1» в море Бисмарка^{1, 2}.

В отличие от ТНПА использование АНПА для детальной съемки рельефа на больших глубинах до настоящего времени представляет собой инновационную задачу, связанную с созданием и внедрением в практику морских глубоководных роботизированных комплексов. Для обеспечения высокоточной навигации и позиционирования на АНПА должно быть установлено следующее основное оборудование: инерциальная навигационная система (ИНС); доплеровский акустический лаг (ДАЛ); впередсмотрящий гидролокатор (ГЛ); альтиметр (эхолот для определения высоты АНПА над дном); гидрологический зонд (СТД-зонд); ГНСС датчик (для определения позиции на поверхности моря); гирокомпас (ГК); маяк-ответчик (МО) ГАНС УКБ, датчики пространственной ориентации и датчик глубины. Для выполнения съемки рельефа дна на АНПА устанавливают МЛЭ или батиметрический ГБО.

Навигация АНПА может осуществляться в трех режимах: автономном режиме с использованием ИНС, ДАЛ, ГК, автономном режиме с коррекцией по ГНСС (при всплытии) и автономном режиме с коррекцией по ГАНС. Точность позиционирования в автономном режиме составляет в реальном времени порядка 0,1–0,2 % от пройденного расстояния (при использовании ДАЛ). В режиме с коррекцией по ГНСС точность позиционирования составляет 2–10 м при продолжительности подводного хода один-два часа. Наиболее точное позиционирование, обеспечиваемое в режиме коррекции по ГАНС, может составлять 1–6 м в зависимости от величины заглубления АНПА. Особенностью применения АНПА для съемки рельефа дна является необходимость постобработки данных позиционирования. Программное обеспечение для работы с АНПА включает:

- программу реального времени для обеспечения выполнения маршрута съемки (в АНПА);
- программы для планирования маршрута, загружаемого в АНПА;
- пакет программ для анализа и постобработки навигации и построения ЦМР дна.

¹ Международная горнорудная компания «Nautilus Minerals Inc» (Наутилус Минералз) [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.nautilusminerals.com/IRM/content/default.aspx>.

² Report. Preliminary Economic Assessment of the SolwaraProjectBismarckSeaPNG». [Электронный ресурс]. Режим доступа: http://www.nautilusminerals.com/irm/PDF/1974_0/PEAoftheSolwaraProjectBismarckSeaPNG.

Программное обеспечение для АНПА является специализированным и, как правило, поставляется в составе морского роботизированного комплекса. До недавнего времени для позиционирования АНПА по ГАНС рассматривалось применение только УКБ ввиду того, что развертывание сети МО на дне, необходимой для применения режима ГАНС с длинной базой (ДБ), как правило, занимает большое количество судового времени. Экономия судового времени НИС является одним из решающих факторов обеспечения эффективности поисково-разведочных работ на ТПИ.

Применение ГАНС УКБ для позиционирования АНПА требует его постоянного сопровождения НИС. Опыт показывает, что на больших глубинах ГАНС УКБ не обеспечивают надежного позиционирования АНПА. Необходимо обеспечить реальную автономность АНПА и его высокоточную навигацию, необходимую для съемки рельефа с помощью МЛЭ, чтобы в то же время НИС могло выполнять решение других задач. С этой целью французская фирма IxBlue создала инновационную технологию использования ГАНС ДБ, предусматривающую размещение на АНПА интеллектуальной акустической системы AMSES, интегрированной с ИНС RHINS при условии установки на морском дне только одного специального МО «CONOPUS»¹. Данная технология основана на жестком комплексировании (Tightly Coupled) данных от акустического модема RAMSES, ИНС RHINS и ДАЛ на основе использования фильтра Калмана. Для успешной работы достаточно одного МО CONOPUS, но при использовании большего количества МО повышается надежность позиционирования и отпадает необходимость постобработки данных для создания ЦМР по результатам съемки рельефа МЛЭ на АНПА. Указанная технология, получившая название «Sparse-LBL navigation» уже прошла успешные морские испытания на НИС французской компании IFREMER при выполнении поисково-разведочных работ на ГПС.

Применительно к поисково-разведочным работам на ГПС можно рекомендовать следующие этапы выполнения перспективного НГО.

1-й этап — съемка рельефа МЛЭ на НИС для получения цифровой батиметрической карты масштаба 1: 50 000 для участка рифта 100–200 км² с выявлением участков детализации для работы с АНПА;

2-й этап — батиметрическая съемка с МЛЭ на АНПА с получением детальной батиметрической карты масштаба 1: 25 000 для участка 20–25 км² и выявлением участка для детальной разведки с помощью ТНПА. Процесс батиметрической съемки с МЛЭ, установленным на АНПА, показан на рис. 7 [15];

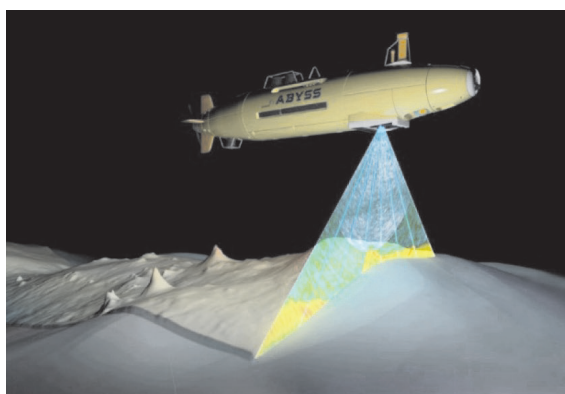


Рис. 7. Батиметрическая съемка с МЛЭ на АНПА

3-й этап — батиметрическая съемка с МЛЭ на ТНПА для поиска и опробования сульфидных построек и создания телеизображений совмещенных с 3D батиметрическими моделями в масштабах 1: 2 000 – 1: 5 000. Процесс батиметрической съемки с помощью МЛЭ на ТНПА представлен на рис. 8.

¹ LBL and sparse LBL intelligent transceiver <https://www.ixblue.com/products/ramses> <https://www.ixblue.com/sites/default/files/2019-01/Ramses%20-%20Datasheet.pdf>.

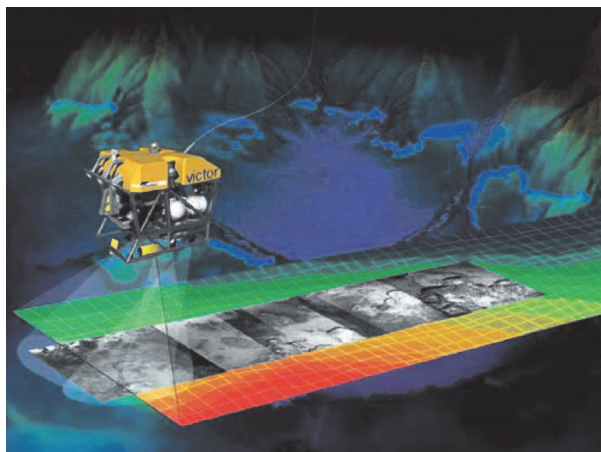


Рис. 8. Батиметрическая съемка с МЛЭ на ТНПА

Особенностью выполнения поисково-разведочных работ на ГПС является необходимость быстрого обследования выбранного гидротермального поля, имеющего размеры 1–2 км, поиск сульфидных построек с поперечным размером до 10 м и выделение активных. Для решения этих задач ТНПА должен быть оснащен системой гидрофизических датчиков и телекамерами для визуального наблюдения за дном.

Создание и использование морских роботизированных комплексов для поиска и разведки глубоководных ТПИ является в настоящее время главной тенденцией в освоении Мирового океана. Промышленные фирмы, такие как Kongsberg Maritime (Норвегия), Sonardyne (Великобритания), IxBlue (Франция), Ocean Floor Geophysics (Канада) и другие, разрабатывают и поставляют морские роботизированные комплексы с АНПА для глубин 3000–6000 м.

Морскими исследовательскими организациями и университетами, которые разрабатывают свои варианты комплексов на базе АНПА и выполняют поисково-разведочные работы с использованием АНПА и ТНПА, являются: Woods Hole Oceanographic Institution (США), Monterey Bay Aquarium Research Institute (США), National Oceanographic Center (Великобритания), IFREMER Marine Geosciences (Франция), GEOMAR Helmholtz Centre for Ocean Research (Германия) и др. Подробное описание технологий НГО и батиметрической съемки с применением АНПА и ТНПА при выполнении поисково-разведочных работ на глубоководные полиметаллические сульфиды приводится в отчете компании «Ifremer» [16].

В России морские роботизированные комплексы создаются как промышленными фирмами, так и научно-производственными предприятиями. В настоящее время созданы ТНПА и АНПА, а также специализированные комплексы для геологоразведки на шельфе и в Мировом океане. Так, в АО «Южморгеология» разработан буксируемый геоакустический комплекс «МАК-Рельеф», предназначенный для решения широкого круга задач и в том числе детальных геолого-геофизических исследований дна океана при поисках и разведке месторождений ГПС на глубинах до 6000 м. Каталог образцов морской робототехники, разработанных российскими предприятиями, представлен в сети Интернет¹. Следует ожидать, что отечественные морские роботизированные комплексы на основе АНПА, предназначенные для специального применения, в ближайшие годы станут доступными для научного использования, в том числе для поисково-разведочных работ на морских месторождениях ТПИ.

В сентябре 2017 г. произошло знаменательное событие в морской горной отрасли — японскими специалистами впервые была проведена добычная операция в трог Окинава. С глубины 1500 м впервые на поверхность были подняты промышленные количества сульфидной руды. Промышленная добыча глубоководных ТПИ, по всей видимости, будет предполагать необходимость

¹ Каталог образцов морской робототехники, разработанных российскими предприятиями. [Электронный ресурс]. — Режим доступа: http://portnews.ru/upload/basefiles/1813_pkpachtpaplpogppo.pdf.

размещение на морском дне подводной геодезической сети на основе ГАНС с длинной базой (ДБ) и большим числом маяков-ответчиков (МО), стационарно установленных на дне. ГАНС ДБ явится основой для высокоточного позиционирования ТНПА, АНПА, а также добычных комбайнов и самого добычного судна. Развитие экспериментальных подводных геодезических сетей в течение ряда лет выполняет компания TOTAL с использованием ГАНС ДБ Fusion 6G фирмы Sonardyne International Ltd. Компания TOTAL уже имеет опыт создания действующих подводных геодезических сетей на нефтяном поле Kaombo, расположенном в 150 км от побережья Нигерии на глубинах 1750 м. При этом были использованы специальные интеллектуальные МО Compatt 6 фирмы Sonardyne и разработаны устройства для долговременного закрепления МО на морском дне. ГАНС ДБ Fusion 6G обеспечивает дециметровый уровень точности планового положения объектов в сети МО на глубинах до 5000 м (модель 8300-5213). Более подробная информация по этому проекту доступна на сайте фирмы Sonardyne в сети Интернет¹. Для успешного перехода к стадии добычи глубоководных ТПИ РФ предстоит пройти этап создания и (или) адаптации, а также освоения необходимых технических средств и технологий. При этом в части НГО предстоит освоить не только технологии детальной съемки рельефа с использованием ТНПА и АНПА, но и создание подводных геодезических сетей для обеспечения высокоточного позиционирования всего используемого подводного оборудования для опытной добычи.

Подготовка специалистов, в том числе гидрографов, для обеспечения детальной съемки рельефа с использованием ТНПА и АНПА является актуальной задачей. В Российской Федерации подготовка специалистов для НГО ГГР только начинается. В ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова по программе магистратуры гидрографам представлен краткий курс по НГО ГГР в рамках дисциплины «Гидрографическое обеспечение морских изысканий». Учитывая новый статус Арктического факультета института «Морская академия» как структурного подразделения ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова, представляется целесообразным расширять общенаучное значение предмета «гидрография» и включить в курс НГО ГГР раздел по морской геоморфологии с элементами геотектоники.

Детальные батиметрические исследования в настоящее время являются ведущим направлением изучения Мирового океана. Ведутся международные батиметрические программы: «GEBCO-2019», «GEBCO Seabed 2030», «EMODnet Bathymetry» и ряд региональных проектов детального изучения топографии дна, а также индивидуальные проекты по изучению морских ТПИ, включающие детальную съемку рельефа. Подробную информацию по изучению рельефа дна Мирового океана с НИС, ТНПА, АНПА и ГОА можно найти в обобщающей работе [15].

Выводы (Summary)

В результате проведенного исследования можно сделать следующие выводы:

1. Поисково-разведочные работы на ГПС предъявляют наиболее высокие требования в НГО. Создание цифровых моделей микрорельефа на основе многолучевой съемки с АНПА и ТНПА является необходимым условием успешного проведения поисковых и разведочных работ на ГПС.
2. Учитывая высокую стоимость морских исследовательских работ на ГПС, их целесообразно выполнять в три последовательных этапа:
 - *региональный этап* при использовании многолучевой съемки с НИС, обеспечивающей создание ЦМР с гридом размерностью 50 м;
 - *поисково-разведочный этап* многолучевой съемки на АНПА при высоте хода над дном 50–100 м, обеспечивающей создание ЦМР с гридом размерностью 1–2 м.
 - *оценочный этап* при использовании многолучевой съемки с ТНПА при высоте хода над дном 10–20 м, обеспечивающий создание ЦМР с гридом размерностью 0,25–0,5 м.
3. Микробатиметрическая съемка с АНПА позволяет независимо от погодных условий достаточно быстро выполнить детальную съемку рельефа на площади десятков квадратных километров и получить ЦМР дна с размером ячейки грида 1–2 м для уточнения общей топографии рифтовой долины, полученной при проведении многолучевой съемки рельефа с НИС.

¹ Total saves time and money with fusion 6G LBL Offshore west Africa [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.sonardyne.com/case-study-total-saves-time-money-fusion-6g-lbl>.

4. Микробатиметрическая съемка с ТНПА должна позволить получать в реальном масштабе времени детальную топографию дна на основе ЦМР рельефа, совмещенного с телевизионным изображением. При этом ЦМР рельефа должна иметь размер ячейки грида 0,25–0,5 м, обеспечивающий опознавание сульфидных построек с линейными размерами в пределах пер-
вых метров.

5. Эффективность перспективных поисково-разведочных работ на ГПС во многом будет за-
висеть от уровня развития морской робототехники и в частности от АНПА при условии внедрения
новых источников их автономного питания, повышающих автономную работу АНПА в течение
более одних суток.

6. Поисково-разведочные и детальные работы на ГПС предъявляют высокие требования
к НИС, которые должны быть оборудованы не только МЛЭ и ГАНС, но и системой динамической
стабилизации, а также эффективными спускоподъемными устройствами, позволяющими исполь-
зовать АНПА и ТНПА даже в сложных погодных условиях.

7. Позиционирование АНПА при выполнении микробатиметрической съемки с МЛЭ на ос-
нове ГАНС УКБ не является надежным и оптимальным. При этом перспективным может быть
использование технологии «Sparse-LBL navigation».

8. Для опытной добычи ГПС в РФ необходимо будет не только создать новые специализиро-
ванные суда и необходимые технические средства для извлечения ГПС, но и осваивать техноло-
гию позиционирования донных добычных комплексов на основе ГАНС с длинной базой.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кеннет Дж. П. Морская геология / Дж. П. Кеннет. — М.: Мир, 1987. — 397 с.
2. Гаврилов В. П. Геотектоника: учеб. для вузов / В. П. Гаврилов. — М.: ФГУП Изд-во «Нефть и газ» РГУ нефти и газа им. И. М. Губкина, 2005. — 368 с.
3. Мазарович А. О. Строение дна Мирового океана и окраинных морей России (учебное пособие). — М.: ГЕОС, 2005. — 192 с.
4. Weatherall P. A new digital bathymetric model of the world's oceans / P. Weatherall [et al] // Earth and Space Science. — 2015. — Vol. 2. — Is. 8. — Pp. 331–345. DOI: 10.1002/2015EA000107.
5. Фирсов Ю. Г. Основы гидроакустики и использование гидрографических сонаров: учеб. пособие / Ю. Г. Фирсов. — СПб.: Изд-во «Нестор-история», 2010. — 348 с.
6. Фирсов Ю. Г. Гидрографические информационные технологии. Часть I. Основы морской геоин-
форматики и гидрографические информационные системы / Ю. Г. Фирсов. — СПб.: Изд-во ГУМРФ им. адм.
С. О. Макарова, 2015. — 128 с.
7. Фирсов Ю. Г. Новые методы пространственной визуализации результатов инженерной батиметри-
ческой съемки / Ю. Г. Фирсов, И. В. Кожухов // Вестник Государственного университета морского и речного
флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2014. — № 2 (24). — С. 17–23.
8. Мировой океан. Т. III: Твердые полезные ископаемые и газовые гидраты в океане. — М.: Научный
мир, 2018. — 708 с.
9. Ondréas H. Recent volcanic events and the distribution of hydrothermal venting at the Lucky Strike
hydrothermal field, Mid-Atlantic Ridge / H. Ondréas [et al] // Geochemistry Geophysics Geosystems. — 2009. —
Vol. 10. — Is. 2. DOI: 10.1029/2008GC002171.
10. Escartin J. Hydrothermal activity along the slow-spreading Lucky Strike ridge segment (Mid-Atlantic
Ridge): Distribution, heatflux, and geological controls / J. Escartin [et al] // Earth and Planetary Science Letters. —
2015. — Vol. 431. — Pp. 173–185. DOI: 10.1016/j.epsl.2015.09.025.
11. Фирсов Ю. Г. Гидрографические информационные технологии. Ч. 2: Гидрографические информа-
ционные системы «НУРАСК» и «QINSy»: учеб. пособие / Ю. Г. Фирсов. — СПб.: Изд-во ГУМРФ им. адм.
С. О. Макарова, 2016. — 284 с.
12. Фирсов Ю. Г. Гидрографические информационные системы. Практическое освоение работы с ги-
дрографической информационной системой QINSy: лабораторный практикум: учебно-метод. пособие /
Ю. Г. Фирсов. — СПб.: Изд-во ГУМРФ им. адм. С. О. Макарова, 2017. — 132 с.

13. Ondréas H. Recent high-resolution mapping of Guaymas hydrothermal fields (Southern Trough) / H. Ondréas, C. Scalabrin, Y. Fouquet, A. Godfroy // Cartographie haute résolution des champs hydrothermaux de la ride sud du bassin de Guaymas // Bulletin de la Société Géologique de France. — 2018. — Vol. 189. — Is. 1. DOI: 10.1051/bsgf/2018005.

14. Фирсов Ю. Г. Гидрографическое обеспечение морских изысканий: учеб. пособие. — СПб.: Изд-во ГУМРФ им. адм. С. О. Макарова, 2017. — 235 с.

15. Wölfl A. C. Seafloor Mapping—the challenge of a truly global ocean bathymetry / A.-C. Wölfl [et al] // Frontiers in Marine Science. — 2019. — Vol. 6. — Article 283. DOI: 10.3389/fmars.2019.00283.

16. Dymont J. Les impacts environnementaux de l'exploitation des ressources minérales marines profondes. Expertise scientifique collective, Rapport, CNRS –Ifremer / J. Dymont [et al.]. — 2014. — 930 p.

REFERENCES

1. Kennet, Dzh.P. *Morskaya geologiya*. M.: Mir, 1987.
2. Gavrilov, V.P. *Geotektonika: Uchebnik dlya vuzov*. M.: FGUP Izd-vo «Neft' i gaz» RGU nefti i gaza im. I.M. Gubkina, 2005.
3. Mazarovich, A.O. *Stroenie dna Mirovogo okeana i okrainnykh morei Rossii (uchebnoe posobie)*. M.: GEOS, 2005.
4. Weatherall, Pauline, K. M. Marks, Martin Jakobsson, Thierry Schmitt, Shin Tani, Jan Erik Arndt, Marzia Rovere, Dale Chayes, Vicki Ferrini, and Rochelle Wigley. “A new digital bathymetric model of the world's oceans.” *Earth and Space Science* 2.8 (2015): 331–345. DOI: 10.1002/2015EA000107.
5. Firsov, Yu.G. *Osnovy gidroakustiki i ispol'zovanie gidrograficheskikh sonarov. Uchebnoe posobie*. SPb.: Izd. «Nestor-istoriya», 2010.
6. Firsov, Yu.G. *Gidrograficheskie informatsionnye tekhnologii. Chast' I. Osnovy morskoi geoinformatiki i gidrograficheskie informatsionnye sistemy*. SPb.: Izd. GUMRF, 2015.
7. Firsov, Yu.G., and I.V. Kozhukhov. “The new three dimensional visualization techniques for bathymetric engineering survey.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova* 2(24) (2014): 17–23.
8. *Mirovoi okean. T. III. Tverdye poleznye iskopaemye i gazovye gidraty v okeane*. M.: Nauchnyi mir, 2018.
9. Ondréas, H., M. Cannat, Y. Fouquet, A. Normand, P. M. Sarradin, and J. Sarrazin. “Recent volcanic events and the distribution of hydrothermal venting at the Lucky Strike hydrothermal field, Mid-Atlantic Ridge.” *Geochemistry, Geophysics, Geosystems* 10.2 (2009). DOI: 10.1029/2008GC002171
10. Escartin, Javier, T. Barreyre, M. Cannat, R. Garcia, N. Gracias, A. Deschamps, A. Salocchi, P.-M. Sarradin, and V. Ballu. “Hydrothermal activity along the slow-spreading Lucky Strike ridge segment (Mid-Atlantic Ridge): Distribution, heatflux, and geological controls.” *Earth and Planetary Science Letters* 431 (2015): 173–185.
11. Firsov, Yu.G. *Gidrograficheskie informatsionnye tekhnologii. Chast' 2. Gidrograficheskie informatsionnye sistemy «HYPACK» i «QINSy». Uchebnoe posobie*. SPb.: Izd. GUMRF, 2016.
12. Firsov, Yu.G. *Gidrograficheskie informatsionnye sistemy. Prakticheskoe osvoenie raboty s gidrograficheskoi informatsionnoi sistemoi QINSy. Laboratornyi praktikum. Uchebno-metodicheskoe posobie*. SPb.: Izd. GUMRF, 2017.
13. Ondréas, Hélène, Carla Scalabrin, Yves Fouquet and Anne Godfroy. “Recent high-resolution mapping of Guaymas hydrothermal fields (Southern Trough) Cartographie haute résolution des champs hydrothermaux de la ride sud du bassin de Guaymas.” *Bulletin de la Société Géologique de France* 189.1 (2018). DOI: 10.1051/bsgf/2018005
14. Firsov, Yu.G. *Gidrograficheskoe obespechenie morskikh izyskaniy. Uchebnoe posobie*. SPb.: Izd-vo GUMRF im. adm. S. O. Makarova, 2017.
15. Wölfl, Anne-Cathrin, Helen Snaith, Sam Amirebrahimi, Colin W. Devey, Boris Dorschel, Vicki Ferrini, Veerle A. I. Huvenne, Martin Jakobsson, Jennifer Jencks, Gordon Johnston, Geoffroy Lamarche, Larry Mayer, David Millar, Terje Haga Pedersen, Kim Picard, Anja Reitz, Thierry Schmitt, Martin Visbeck, Pauline Weatherall, and Rochelle Wigley. “Seafloor Mapping—the challenge of a truly global ocean bathymetry.” *Frontiers in Marine Science* 6 (2019). Article 283. DOI: 10.3389/fmars.2019.00283
16. Dymont, J., F. Lallier, N. Le Bris, O. Rouxel, P.-M. Sarradin, S. Lamare, C. Coumert, M. Morineaux, and J. Tourolle. *Les impacts environnementaux de l'exploitation des ressources minérales marines profondes*. Expertise scientifique collective, Rapport, CNRS –Ifremer. 2014.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Фирсов Юрий Георгиевич —

кандидат технических наук, доцент

ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала

С. О. Макарова»

198035, Российская Федерация, Санкт-Петербург,

ул. Двинская, 5/7

e-mail: gidrograph@mail.ru, kaf_gm@gumrf.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Firsov, Yury G. —

PhD, associate professor

Admiral Makarov State University of Maritime

and Inland Shipping

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

Russian Federation

e-mail: gidrograph@mail.ru, kaf_gm@gumrf.ru

Статья поступила в редакцию 22 октября 2019 г.

Received: October 22, 2019.

СУДОСТРОЕНИЕ И СУДОРЕМОНТ

DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-6-1088-1095

FEATURES OF WEAR OF CYLINDER LINERS OF MARINE MEDIUM-SPEED DIESEL ENGINES

L. B. Leont'ev¹, A. V. Pogodaev¹, V. P. Bolotova²

¹ — Far Eastern Federal University, Vladivostok, Russian Federation

² — Maritime State University named after admiral G.I. Nevelskoy,
Vladivostok, Russian Federation

The amount of wear on the working surface of the cylinder liners of marine diesel engines has a significant impact on the durability, performance and emergency situations in the engine. An analysis of changes in the geometric parameters of the working surface of the cylinder liners during operation and repair is carried out on the example of marine medium-speed diesel engines of the Pielstick 6PC2-5L type (ChN 40/48), operated on heavy grades of fuel.

It is established that the magnitudes of wear and deviations of the working surface shape of one diesel engine liners after 12 thousand hours of operation can fluctuate in a wide range: from 0.05 mm to 0.60 mm. The wear time and the mechanical properties of cast iron have a significant effect the wear and tear and shape deviations.

An analysis of the geometric parameters of the cylinder sleeves for restoration has showed that 56.7% of the sleeves after operating the engines for about 12 thousand hours, regardless of the value of their running hours, have wear values in the region of the upper piston ring when the piston position in the top dead center (TDC) is not more than 0.5 mm. Moreover, the maximum number of bushings (18.1%) have wear values in the range of 0.11–0.20 mm with a maximum allowable value of 2 mm.

The analysis of the ovality values of cylinder sleeves received for recovery after 11–12 thousand hours of engine operation has showed that the largest number of bushings (21.8%) have an ovality in the range of 0.06–0.10 mm with a maximum permissible value of 0.3 mm.

A significant increase in the wear rate of the working surface of the sleeve in the region of the upper piston ring when the piston is in TDC is observed when the sleeve has been running over 36 thousand hours due to high temperatures and changes in the structure and mechanical properties of cast iron.

Due to the uneven wear along the height of the cylinder bore, as well as local wear in the upper piston ring region when the piston is in the TDC, most of the bushings cannot be restored by honing after 36 thousand hours of operation due to the limited capabilities of this method (processing is economically feasible when removing metal on a depth of 0.10–0.15 mm, which is insufficient to eliminate large amounts of wear), so the bushings are written off when the wear of the working surface is less than 1 mm with a maximum allowable value of 2 mm.

Keywords: cylinder bushing, diesel, wear, ovality, hardening, honing, wear plot, wear rate.

For citation:

Leont'ev, Lev B., Anton V. Pogodaev, and Valentina P. Bolotova. "Features of wear of cylinder liners of marine medium-speed diesel engines." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admiral S. O. Makarova* 11.6 (2019): 1088–1095. DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-6-1088-1095.

УДК 621.432

ОСОБЕННОСТИ ИЗНАШИВАНИЯ ВТУЛОК ЦИЛИНДРОВ СУДОВЫХ СРЕДНЕОБОРОТНЫХ ДИЗЕЛЕЙ

Л. Б. Леонтьев¹, А. В. Погодаев¹, В. П. Болотова²

¹ — Дальневосточный федеральный университет, Владивосток, Российская Федерация

² — Морской государственный университет им. адм. Г. И. Невельского,
Владивосток, Российская Федерация

Отмечается, что величина износа рабочей поверхности втулок цилиндров судовых дизелей оказывает существенное влияние на долговечность, а также возникновение аварийных ситуаций в двигателе. Анализ изменения геометрических параметров рабочей поверхности втулок цилиндров в процессе эксплуата-

ции и ремонта выполнен на примере судовых среднеоборотных дизелей типа Pielstick 6PC2-5L (ЧН 40/46). Установлено, что величины износов и отклонений формы рабочей поверхности втулок одного дизеля после 12 тыс. ч эксплуатации могут колебаться в широком диапазоне: от 0,05 мм до 0,60 мм. Анализ геометрических параметров втулок цилиндров, поступающих на восстановление, показал, что 56,7 % втулок после эксплуатации двигателей в течение примерно 12 тыс. ч, независимо от величины их наработки, имеют величины износов в районе верхнего поршневого кольца при положении поршня в верхней мертвой точке не более 0,5 мм. При этом максимальное количество втулок (18,1 %) имеют величины износов в пределах 0,11–0,20 мм при максимально допустимой величине 2 мм. Анализ величин овальности втулок цилиндров, поступающих на восстановление после 11–12 тыс. ч эксплуатации двигателей, показал, что наибольшее количество втулок (21,8 %) имеют овальность в интервале 0,06–0,10 мм при максимально допустимой величине 0,3 мм. Существенное возрастание скорости изнашивания рабочей поверхности втулки в районе верхнего поршневого кольца при положении поршня в ВМТ, наблюдается при наработке втулки свыше 36 тыс. ч. Из-за неравномерного износа по высоте втулки цилиндра, а также локальных износов в районе верхнего поршневого кольца при положении поршня в ВМТ большинство втулок не могут быть восстановлены хонингованием после 36 тыс. ч эксплуатации вследствие ограниченных возможностей данного метода, поэтому втулки списываются при износах рабочей поверхности менее 1 мм при максимально допустимой величине 2 мм.

Ключевые слова: втулка цилиндра, дизель, износ, овальность, упрочнение, хонингование, эпюра износов, скорость изнашивания.

Для цитирования:

Леонтьев Л. Б. Особенности изнашивания втулок цилиндров судовых среднеоборотных дизелей / Л. Б. Леонтьев, А. В. Погодаев, В. П. Болотова // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2019. — Т. 11. — № 6. — С. 1088–1095. DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-6-1088-1095.

Введение (Introduction)

Износы поверхностей трения деталей цилиндро-поршневой группы судовых дизелей оказывают решающее влияние на долговечность, работоспособность и возникновение аварийных ситуаций двигателя. Наиболее неблагоприятные условия трения в цилиндре судовых дизелей возникают в зоне минимальных скоростей движения поршня, особенно при положении поршня в верхней мертвой точке (ВМТ), где температура поверхностей трения в районе верхнего поршневого кольца достигает 350 °С при максимальном давлении до 16 МПа и минимальной толщине масляной пленки. Причем в районе верхнего поршневого кольца при положении поршня в ВМТ происходит почти полное разрушение масляной пленки, т. е. наблюдается режим трения при граничной смазке, поэтому величина коэффициента трения находится в пределах 0,02–0,2 [1], [2] и, соответственно, скорость изнашивания в данном районе будет максимальной. До настоящего времени не существует единого мнения о природе изнашивания втулок цилиндров ДВС. Однако большинство авторов считают, что верхняя часть втулки цилиндра одновременно подвергается адгезионному, усталостному, коррозионно-механическому и абразивному изнашиванию [1]–[3].

Втулки ДВС изнашиваются неравномерно по длине образующей цилиндра. У судовых дизелей, имеющих большие величины предельных износов, происходит значительное изменение макрогеометрии цилиндра в процессе эксплуатации, особенно в верхней части втулки [4]. Большая разница в диаметрах цилиндра по его высоте отрицательно сказывается на всех показателях работы двигателя: увеличиваются расходы топлива и масла на угар [5]. Следует отметить, что образование лаковых пленок на поверхности трения (особенно при использовании тяжелых сортов топлива) препятствует соприкосновению поверхностей поршневого кольца и втулки, уменьшая вероятность адгезионного их схватывания, но увеличивает скорость абразивного изнашивания. Для повышения износостойкости рабочей поверхности втулок цилиндров дизелей их подвергают хонингованию алмазными брусками [5]–[10]. В результате последовательных операций чернового хонингования крупнозернистыми брусками и чистового хонингования мелкозернистыми брусками микрорельеф представляет собой чередование глубоких рисок (рис. 1, а) для размещения смазки (масляных карманов) и плоских плато, увеличивающих необходимую относительную опорную длину профиля (опорную поверхность) и маслосъемность поверхности.

Целью работы является анализ изменения геометрических параметров рабочей поверхности втулок цилиндров в процессе эксплуатации и ремонта на примере судовых среднеоборотных дизелей типа Pielstick 6PC2-5L (ЧН 40/46), эксплуатирующихся на тяжелых сортах топлива.

Методы и материалы (Methods and Materials)

Для оценки величин и характера износа рабочей поверхности втулок цилиндров после их эксплуатации и ремонта выполнялись измерения с помощью индикаторного нутромера по четырем сечениям в двух взаимно перпендикулярных плоскостях: в плоскости, проходящей через ось коленчатого вала, и в плоскости, перпендикулярной оси коленчатого вала согласно рекомендациям фирмы-изготовителя. По результатам оценки технического состояния втулки цилиндра делается вывод о возможности ее восстановления методом хонингования или замены на новую.

Для исследования изменений геометрических параметров втулок цилиндров в процессе эксплуатации и ремонта были взяты среднеоборотные двигатели Pielstick 6PC2-5L (ЧН 40/46) с газотурбинным наддувом, имеющие частоту вращения $8,67 \text{ с}^{-1}$ (520 мин⁻¹), цилиндровую мощность 478 кВт, среднее эффективное давление 17,2 бар, которые эксплуатируются на тяжелом топливе марки M100 и моторном масле М-14-Д₂(цл 30) — ГОСТ 12337–84. Двигатели установлены на рыбопромысловых судах типа БМРТ.

Величины износов втулок цилиндров определяли по формуле

$$И = D_n - D_3, \quad (1)$$

где D_n — диаметр втулки до эксплуатации; D_3 — диаметр втулки после эксплуатации.

Величины овальности втулок цилиндров в исследуемых сечениях определяли по формуле

$$\Delta = D_1 - D_2, \quad (2)$$

где D_1 и D_2 — диаметры, измеренные в двух взаимно-перпендикулярных направлениях (в плоскости движения шатуна и по оси коленчатого вала).

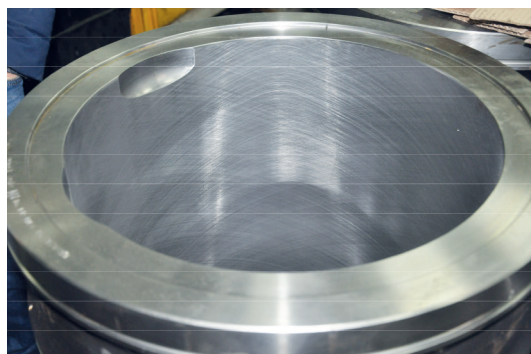
Результаты и обсуждение (Results and Discussion)

Новые втулки и после ремонта имеют микрорельеф рабочей поверхности, представляющий чередование плоских плато и глубоких рисок (см. рис. 1, а), который после 12 тыс. ч эксплуатации из-за износа уже не имеет рисок в верхней части втулки (рис. 1, б). Для оценки величин и характера износа рабочей поверхности втулок цилиндров были проанализированы результаты измерений 210 втулок цилиндров, поступивших в ремонт, а также после их хонингования в период 2004–2015 гг. Средняя наработка двигателя между ремонтами с восстановлением геометрии втулок цилиндров составляет 11–12 тыс. ч.

Установлено, что величины износов и отклонений формы рабочей поверхности втулок у одного дизеля после 12 тыс. ч. эксплуатации могут колебаться в широком диапазоне. Например, у одной втулки максимальный износ может составлять всего 0,05 мм, при этом у другой он может достигать 0,60 мм, поэтому в ремонт отправляют все втулки двигателя. На величину износов и отклонений формы существенное влияние оказывает наработка втулки и механические свойства чугуна.

После восстановления геометрических размеров методом хонингования диаметр втулки по сравнению с величиной максимального износа увеличивается в верхней ее части при длине 400–500 мм на 0,05–0,11 мм. Следует отметить, что зона максимальных локальных износов расположена в районе верхнего поршневого кольца при положении поршня в ВМТ в направлении *борт – борт* и составляет около 90° с каждой стороны, при этом по высоте она достигает всего 12–20 мм, что хорошо видно в процессе хонингования втулок (см. рис. 1, б). Как правило, локальные износы в плоскости *борт – борт* существенно отличаются по величине, а иногда расположены преимущественно с одной стороны.

а)



б)



Рис. 1. Рабочая поверхность втулки цилиндра дизеля 6PC2-5L:

а — после хонингования;

б — после 12 тыс. ч эксплуатации в процессе хонингования с локальными износами

Анализ геометрических параметров втулок цилиндров, поступающих на восстановление, показал, что 56,7 % из них после эксплуатации двигателей в течение примерно 12 тыс. ч независимо от наработки имеют величины износов в районе верхнего поршневого кольца при положении поршня в ВМТ не более 0,5 мм (рис. 2, а). При этом максимальное количество втулок (18,1 %) имеют величину износов в пределах 0,11–0,20 мм при максимально допустимой величине 2 мм. Количество втулок, имеющих износы свыше 1 мм, незначительно вследствие того, что в результате восстановления геометрии втулок методом хонингования после каждых 12 тыс. ч эксплуатации возрастает величина конусообразности рабочей поверхности (рис. 3) вследствие малой величины снимаемого слоя в процессе обработки, поэтому устраняются преимущественно локальные износы в верхней ее части, а втулки с повышенной величиной конусообразности заменяют на новые.

Распределение количества втулок цилиндров дизелей ЧН 40/46 с величинами износа в районе верхнего поршневого кольца при положении поршня в ВМТ, поступающих на ремонт, описывается выражением ($R^2 = 0,938$; $S = 1,76$):

$$N_{\text{и}} = 4,19 \cdot 0,85^{(1/\text{И})} \cdot \text{И}^{-1,31}, \quad (3)$$

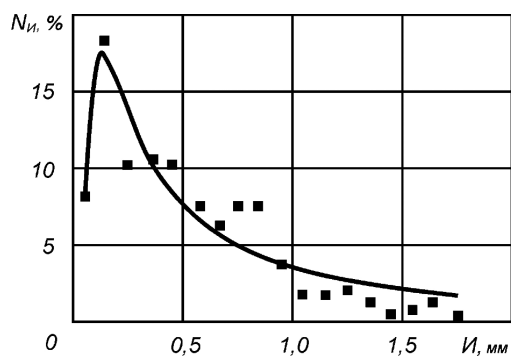
где $N_{\text{и}}$ — количество втулок цилиндров с величиной износа И ; И — максимальная величина износа втулки, мм.

Анализ величин овальности втулок цилиндров, поступающих на восстановление после 11–12 тыс. ч эксплуатации двигателей, показал, что 88,8 % втулок имеют величины в пределах 0,01–0,30 мм при максимально допустимой величине 0,3 мм. Причем максимальное количество втулок (21,8 %) имеют овальность в интервале 0,06–0,10 мм (рис. 2, б). Распределение количества втулок цилиндров дизелей ЧН 40/46 с величинами овальности, поступающих на ремонт, описывается выражением ($R^2 = 0,995$; $S = 0,84$):

$$N_{\Delta} = 1 / (0,068 - 0,535\Delta + 3,18\Delta^2), \quad (4)$$

где N_{Δ} — количество втулок цилиндров с величиной овальности Δ ; Δ — максимальная величина овальности втулки, мм.

а)



б)

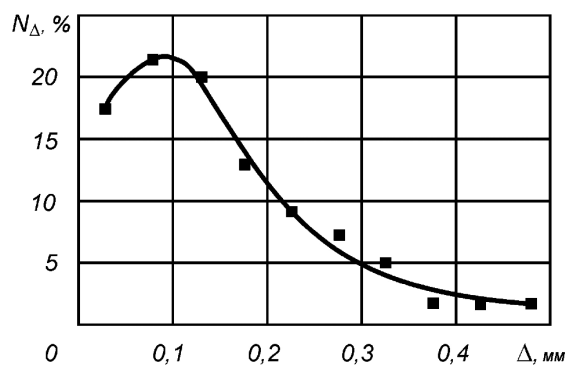


Рис. 2. Распределение количества втулок цилиндров дизелей ЧН 40/46, поступающих на восстановление, с величинами износа (а) и овальности (б)

Анализ эпюр износов втулок цилиндров дизеля ЧН 40/48 по высоте (рис. 3) показал, что по мере увеличения наработки возрастает конусообразность в верхней части вследствие малой величины удаления металла при механической обработке хонингованием, поэтому при их ремонте устраняется преимущественно овальность рабочей поверхности.

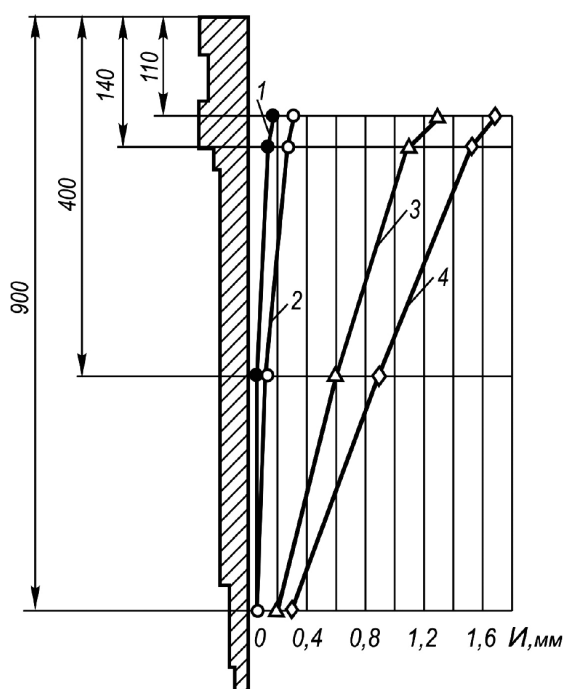


Рис. 3. Эпюры износов втулок цилиндров дизеля ЧН 40/46 по высоте в плоскости *борт – борт*, поступающих на ремонт: 1 — после 12 тыс. ч эксплуатации; 2 — после 24 тыс. ч эксплуатации; 3 — после 48 тыс. ч эксплуатации и хонингования; 4 — после 60 тыс. ч эксплуатации

Анализ средней скорости изнашивания втулок цилиндров дизеля ЧН 40/48 в районе верхнего поршневого кольца при положении поршня в ВМТ от величины ее наработки показал, что на начальном этапе эксплуатации, т. е. в течение первых 12 тыс. ч скорость существенно больше, чем на втором этапе (12–24 тыс. ч) вследствие приработки сопряженных поверхностей втулки

и поршневых колец, а также формирования вторичных структур (рис. 4). Затем скорость изнашивания снижается. Возрастание скорости изнашивания наблюдается при наработке втулки свыше 36 тыс. ч воздействия высоких температур и изменения структуры и механических свойств чугуна в районе верхнего поршневого кольца при положении поршня в ВМТ.

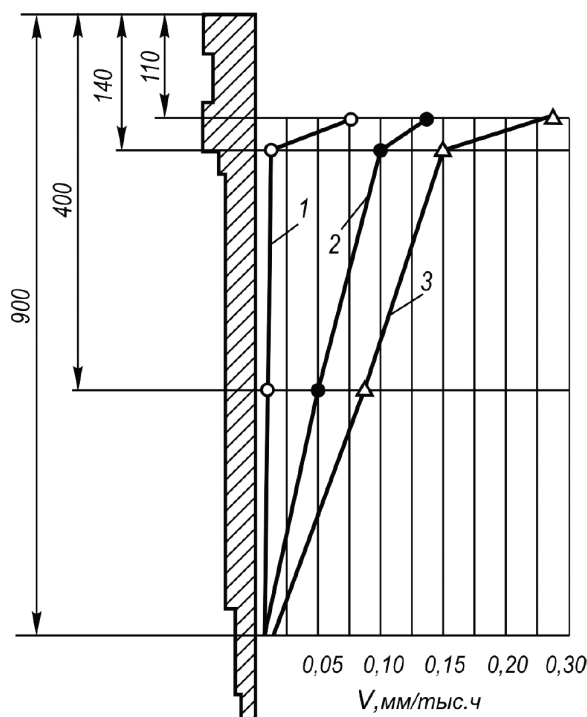


Рис. 4. Зависимость средней скорости изнашивания втулки цилиндра дизеля ЧН 40/46 в районе верхнего поршневого кольца при положении поршня в ВМТ от величины ее наработки:
1 — в течение вторых 12 тыс. ч эксплуатации (суммарная наработка 24 тыс. ч);
2 — в течение первых 12 тыс. ч эксплуатации; 3 — после 36 тыс. ч эксплуатации

Следует отметить, что из-за местных износов большинство втулок цилиндров считаются неремонтопригодными уже после 36 тыс. ч эксплуатации и списываются при износах рабочей поверхности не более 1 мм при максимально допустимой величине 2 мм. Повысить срок службы втулок цилиндров среднеоборотных двигателей, работающих на тяжелых сортах топлива, и снизить затраты на приобретение новых наиболее экономически эффективно путем формирования тонкопленочных металлокерамических износостойких покрытий на поверхностях трения [6], [11]. Наиболее перспективными триботехническими материалами для присадок к машинным маслам и трибомодифицирования при ремонте деталей являются органо-неорганические композиции и композиты на основе модифицированного вермикулита, так как они способны формировать защитные металлокерамические пленки толщиной 2–5 мкм, содержащие в большом количестве такие элементы, как Si, Al, O, C и др. [12]. Полученная в результате обработки ТМ металлокерамическая поверхность является продолжением структуры самого металла — одним с ним целым, и имея одинаковое линейное температурное расширение, не отслаивается под действием механических и тепловых нагрузок. Применение финишной обработки ТМ позволяет снизить коэффициент трения не менее чем на 15–20 %, интенсивность изнашивания поверхностей трибосопряжения в 1,5–4,0 раза, а также увеличить поверхностную твердость и нагрузку схватывания на 25–30 % [6], [11]–[13].

Заключение (Conclusion)

Установлено, что после 12 тыс. ч эксплуатации двигателя величины износов и отклонений формы рабочей поверхности втулок могут колебаться в широком диапазоне: от 0,05 мм до 0,60 мм.

На величины износов и отклонений формы существенное влияние оказывает наработка втулки и механические свойства чугуна. Так, 56,7 % цилиндров, поступающих на восстановление, после эксплуатации двигателей в течение примерно 12 тыс. ч независимо от величины их наработки имеют величины износов в районе верхнего поршневого кольца при положении поршня в ВМТ не более 0,5 мм. При этом максимальное количество втулок (18,1 %) имеют величины износов в пределах 0,11–0,20 мм при максимально допустимой величине 2 мм. Наибольшее количество втулок (21,8 %) после 11–12 тыс. ч эксплуатации двигателей имеют овальность в интервале 0,06–0,10 мм при максимально допустимой величине 0,3 мм.

Существенное возрастание скорости изнашивания рабочей поверхности втулки в районе верхнего поршневого кольца при положении поршня в ВМТ наблюдается при наработке втулки свыше 36 тыс. ч вследствие воздействия высоких температур и изменения структуры и механических свойств чугуна. Из-за неравномерного износа по высоте втулки цилиндра, а также локальных износов в районе верхнего поршневого кольца при положении поршня в ВМТ большинство втулок не могут быть восстановлены хонингованием после 36 тыс. ч эксплуатации вследствие ограниченных возможностей данного метода (обработка экономически целесообразна при снятии металла на глубину 0,10–0,15 мм, которая недостаточна для устранения больших величин износов), поэтому втулки списываются при износах рабочей поверхности менее 1 мм при максимально допустимой величине 2 мм.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Асташкевич Б. М. Износостойкость и прочность деталей цилиндропоршневой группы транспортных двигателей / Б. М. Асташкевич // Вестник машиностроения. — 1997. — № 10. — С. 8–11.
2. Асташкевич Б. М. Износостойкость и роль активных защитных слоев на поверхностях деталей цилиндропоршневой группы транспортных двигателей // Вестник машиностроения. — 2000. — № 1. — С. 13–20.
3. Абраменко Ю. Е. Физико-химическая природа изнашивания чугунных гильз цилиндров ДВС / Ю. Е. Абраменко // Двигателестроение. — 1984. — № 3. — С. 38–40.
4. Кучеров В. Н. Повышение работоспособности деталей цилиндро-поршневой группы двигателей ZL и ZV фирмы «Зульцер» / В. Н. Кучеров, М. В. Флорианская // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока. — 2016. — № 3–4. — С. 88–93.
5. Клименко Л. П. Повышение долговечности цилиндров ДВС на основе принципов переменной износостойкости / Л. П. Клименко; под ред. В. В. Запорожца. — Николаев: Изд-во НФ НаУКМА, 2001. — 294 с.
6. Леонтьев Л. Б. Повышение надежности втулок цилиндров судовых дизелей / Л. Б. Леонтьев, А. В. Погодаев, А. Л. Леонтьев // Вестник Инженерной школы Дальневосточного федерального университета. — 2018. — № 3 (36). — С. 76–93. DOI: 10.5281/zenodo.1408233.
7. Баранов В. Л. Финишная обработка внутренней поверхности цилиндров двигателей внутреннего сгорания / В. Л. Баранов [и др.] // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. — 2016. — № 12-2. — С. 15–21.
8. Шарифов З. З. Исследование влияния шероховатости поверхности на износ поверхностного слоя деталей судовых машин и механизмов, обработанных различными методами / З. З. Шарифов, Ч. М. Алиев, А. М. Кулиев // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2017. — Т. 9. — № 6. — С. 1262–1272. DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-6-1262-1272.
9. Taylor C. M. Automobile engine tribology—design considerations for efficiency and durability / C. M. Taylor // Wear. — 1998. — Vol. 221. — Is. 1. — Pp. 1–8. DOI: 10.1016/S0043-1648(98)00253-1.
10. Степанов С. Н. Особенности платохонингования при капитальном ремонте двигателей внутреннего сгорания / С. Н. Степанов, Н. Ю. Видинеева // Современное машиностроение. Наука и образование. — 2016. — № 5. — С. 1000–1005. DOI: 10.1872/MMF-2016-91.
11. Ломухин В. Б. Использование модификатора моторного масла на основе серпентина и мягких металлов в судовых энергетических установках / В. Б. Ломухин [и др.] // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока. — 2014. — № 3. — С. 136–139.
12. Shapkin N. P. Hybrid Composite Materials Based on Natural Layered Silicates / N. P. Shapkin [et al.] // Inorganic Materials. — 2018. — Vol. 54. — Is. 9. — Pp. 965–969. DOI: 10.1134/S0020168518090145.
13. Дунаев А. В. Эффективность применения минеральных модификаторов при техническом сервисе в АПК: науч. изд. / А. В. Дунаев [и др.]. — М.: ФГБНУ «Росинформагротех», 2014. — 164 с.

REFERENCES

1. Astashkevich, B. M. "Iznosostoykost' i prochnost' detaley tsilindroporshnevoy gruppy transportnykh dvigateley." *Vestnik mashinostroyeniya* 10 (1997): 8–11.
2. Astashkevich, B. M. "Iznosostoykost' i rol' aktivnykh zashchitnykh sloyev na poverkhnostyakh detaley tsilindroporshnevoy gruppy transportnykh dvigateley." *Vestnik mashinostroyeniya* 1 (2000): 13–20.
3. Abramenko, Yu. Ye. "Fiziko-khimicheskaya priroda iznashivaniya chugunnykh gil'z tsilindrov DVS." *Dvigatelsestroyeniye* 3 (1984): 38–40.
4. Kucherov, V. N., and M. V. Florianskaya. "Improving the performance parts engine type ZL, ZV «Sulzer» company." *Nauchnyye problemy transporta Sibiri i Dal'nego Vostoka* 3–4 (2016): 88–93.
5. Klimenko, L. P. *Povysheniye dolgovechnosti tsilindrov DVS na osnove printsipov peremennoy iznosostoykosti*. Edited by V. V. Zaporozhets. Nikolayev: Izd-vo NF NaUKMA, 2001.
6. Leont'ev, L. B., A. V. Pogodayev, and A. L. Leont'ev. "Increasing the reliability of cylinder liners of marine diesel engines (Review)." *The Far Eastern Federal University: School of Engineering Bulletin* 3(36) (2018): 76–93. DOI: 10.5281/zenodo.1408233.
7. Baranov, V. L., E. A. Dronov, V. N. Lavrukhin, and N. V. Tret'yakov. "Finish machining the inner surface of cylinder of explosion engine." *Izvestiya Tula State University. Engineering science* 12-2 (2016): 15–21.
8. Sharifov, Zahid Z., Chingiz M. Aliyev, and Alimardan M. Guliyev. "Research of surface roughness influence on ware resistant characteristics of ship machinery and mechanisms parts' surface layer processed with different methods." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova* 9.6 (2017): 1262–1272. DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-6-1262-1272.
9. Taylor, C. M. "Automobile engine tribology—design considerations for efficiency and durability." *Wear* 221.1 (1998): 1–8. DOI: 10.1016/S0043-1648(98)00253-1.
10. Stepanov, S.N., and N.Yu. Vidineyeva. "Osobennosti platkhoningovaniya pri kapital'nom remonte dvigateley vnutrennego sgoraniya." *Sovremennoye mashinostroyeniye. Nauka i obrazovaniye* 5 (2016): 1000–1007. DOI: 10.1872/MMF-2016-91.
11. Lomukhin, V. B., A. O. Tokarev, V. V. Surgin, and I. V. Lapteva. "The use of engine oil based on serpentine and soft metals in ship power installations." *Nauchnyye problemy transporta Sibiri i Dal'nego Vostoka* 3 (2014): 136–139.
12. Shapkin, N. P., I. G. Khal'chenko, A. E. Panasenkov, L. B. Leont'ev, and V.I. Razov. "Hybrid Composite Materials Based on Natural Layered Silicates." *Inorganic Materials* 54.9 (2018): 965–969. DOI: 10.1134/S0020168518090145.
13. Dunayev, A. V., V. V. Ladikov, I. F. Pustovoy, and I. G. Golubev. *Effektivnost' primeneniya mineral'nykh modifikatorov pri tekhnicheskoy servise v APK: nauch. izdaniye*. M.: FGBNU «Rosinformagrotekh», 2014.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Леонтьев Лев Борисович —
доктор технических наук, профессор
Дальневосточный федеральный университет
690850, Российская Федерация, Владивосток,
ул. Суханова, 8
e-mail: leontyev.l.b@yandex.ru
Погодаев Антон Васильевич —
старший преподаватель
Дальневосточный федеральный университет
690850, Российская Федерация, Владивосток,
ул. Суханова, 8
e-mail: pogodaev.av@dvfu.ru
Болотова Валентина Павловна — доцент
Морской государственный университет
им. адм. Г. И. Невельского
600003, Российская Федерация, Владивосток,
ул. Верхнепортовая, 50а
e-mail: bolotova@msun.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Leont'ev, Lev B. —
Dr. of Technical Sciences, professor
Far Eastern Federal University
8 Sukhanova Str., Vladivostok, 690850,
Russian Federation
e-mail: leontyev.l.b@yandex.ru
Pogodaev, Anton V. —
Senior Lecturer
Far Eastern Federal University
8 Sukhanova Str., Vladivostok, 690850,
Russian Federation
e-mail: pogodaev.av@dvfu.ru
Bolotova, Valentina P. — Associate professor
Maritime State University named
after adm. G. I. Nevelsky
50a Verkhneportovaya Str., Vladivostok, 600003,
Russian Federation
e-mail: bolotova@msun.ru

Статья поступила в редакцию 24 октября 2019 г.

Received: October 24, 2019.

SIMULATION OF CAVITATING JET OUTFLOW ONTO BIOFOULING OF SHIPBUILDING STEEL SURFACE

A. I. Ukolov, V. P. Rodionov

Kerch State Maritime Technological University, Kerch, Russian Federation

*An experiment on fouling the surface of shipbuilding steel of A40S grade in the natural marine conditions of the Kerch Strait is carried out. After being under the water for 8 months (August-March), overgrowths of the following groups are found: sessile polychaete worms - *Serpula* (*Serpula vermicularis*), *balanus* (*Chthamalus stellatus*), bryozoa (*Bryozoa*) and green algae (*Chlorophyta*). Measurement of their strength characteristics has showed that the fundamental difficulties at cleaning the vessel hull are caused by the fouling with *balanus*, the fracture threshold pressure of which depending on its size and density on the surface is 5-25 MPa. To implement underwater cleaning with a submerged jet at lower pressures, the use of the simultaneous action of a dynamic and cavitation effect has been proposed. Numerical simulation of the outflow of fluid into the flooded space through a 30 mm long nozzle consisting of a tapered truncated cone with 20 mm height and an imaginary angle at the vertex of 20° and expanding with 10 mm height with an angle of 10° has revealed areas of the maximum vapor phase fraction on the surface of the fouling model, and its relationship with absolute pressure distribution. These parameters depend on the jet orientation and the distance to the obstacle, made in the form of a hemisphere, due to the internal structure of the cavitating jet, which in the cross section has a different concentration of gas-vapor bubbles. When the jet flows perpendicular to the fouling plane, the vapor phase concentration has a maximum at the edges of the hemispherical barrier, which are smoothed with increasing distance from the cavitator cutoff to the fouling model. The inclination of the jet by 45° from the perpendicular direction leads to an increase in the cavitation effect. The maximum vapor phase shifts in the opposite direction from the location of the nozzle, and has a sharp decline at the leading edge of fouling. The study is aimed at improving the cleaning process of the underwater part of the hull, using economical and small-sized installations.*

Keywords: submerged jet, nozzle, cavitation, fouling, shipbuilding steel, pressure, destruction, modeling.

For citation:

Ukolov, Aleksey I., and Victor P. Rodionov. "Simulation of cavitating jet outflow onto biofouling of shipbuilding steel surface." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admiral S. O. Makarova* 11.6 (2019): 1096–1106. DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-6-1096-1106.

УДК 532.5

МОДЕЛИРОВАНИЕ ИСТЕЧЕНИЯ КАВИТИРУЮЩЕЙ СТРУИ НА БИООБРАСТАНИЕ ПОВЕРХНОСТИ СУДОСТРОИТЕЛЬНОЙ СТАЛИ

А. И. УКОЛОВ, В. П. РОДИОНОВ

ФГБОУ ВО «Керченский государственный морской технологический университет»,
Керчь, Российская Федерация

*Выполнен эксперимент по обрастанию поверхности судостроительной стали марки А40S в естественных морских условиях Керченского пролива. После нахождения под водой в течение восьми месяцев (август–март) выявлены обрастатели следующих групп: сидячие многощетинковые черви — серпулы (*Serpula vermicularis*), баянусы (*Chthamalus stellatus*), мишанки (*Bryozoa*) и зеленые водоросли (*Chlorophyta*). Измерение их прочностных характеристик показало, что основные трудности при очистке корпуса судна вызваны обрастанием баянусом, пороговое давление разрушения которого в зависимости от его размера и плотности на поверхности составило 5–25 МПа. Для реализации подводной очистки затопленной струей при более низких давлениях предложено использование одновременного действия динамического и кавитационного эффекта. Численное моделирование истечения жидкости в затопленное пространство через сопло длиной 30 мм, состоящее из сужающегося усеченного конуса высотой 20 мм и мнимым углом у вершины 20° и расширяющегося высотой 10 мм с углом 10°, выявило области максимальной доли паровой фазы на поверхности модели обрастания и ее связь с распределением абсолютного давления. Эти параме-*

тры зависят от ориентации струи и расстояния до преграды, выполненной в виде полусферы, что обусловлено внутренней структурой кавитирующей струи, которая в сечении имеет различную концентрацию газопаровых пузырьков. При истечении струи перпендикулярно плоскости с обрастанием концентрация паровой фазы имеет максимум по краям полусферической преграды, которые сглаживаются с увеличением расстояния от среза кавитатора до модели обрастания. Наклон струи на 45° от перпендикулярного направления приводит к усилению кавитационного влияния. Максимум паровой фазы сдвигается в противоположную сторону от расположения сопла и имеет резкий спад на переднем крае обрастания. Выполненное исследование направлено на усовершенствование процесса очистки подводной части корпуса судна с использованием экономичных и малогабаритных установок.

Ключевые слова: затопленная струя, сопло, кавитация, обрастание, судостроительная сталь, давление, разрушение, моделирование.

Для цитирования:

Уколов А. И. Моделирование истечения кавитирующей струи на биообрастание поверхности судостроительной стали / А. И. Уколов, В. П. Родионов // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2019. — Т. 11. — № 6. — С. 1096–1106. DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-6-1096-1106.

Введение (Introduction)

Сопротивление корпуса имеет первостепенное значение для судов, поскольку напрямую влияет на их скорость, мощность и расход топлива. Лучшим способом для уменьшения сопротивления вязкого трения является применение обработки корпуса судна для того, чтобы минимизировать его физическую и биологическую шероховатость. Физическая шероховатость может быть сведена к минимуму путем применения определенных профилактических мер, но биологическое загрязнение труднее контролировать. Биообрастание имеет три основных отрицательных эффекта, которые включают в себя увеличение сопротивления и потребления топлива, нанесение ущерба пленкам краски и перенос чужеродных видов, угрожающих биологическому разнообразию [1]–[3]. Уровень загрязнения зависит от нескольких факторов, включая период времени, проведенного в море, температуру воды, географическое положение судна, условия на поверхности и соленость моря. Обрастание начинается происходить сразу после погружения в воду и продолжается в течение всего периода эксплуатации судна в море до тех пор, пока не будет выполнен процесс очистки.

Усовершенствовать процесс подводной очистки можно с применением кавитационного эффекта. Кавитация — это физическое явление, которое происходит в жидкости, когда величина статического давления становится ниже некоторого порогового значения. Явление кавитации характеризуется образованием кавитационных пузырьков. По мере того как пузырьки разрушаются вблизи твердой стены, энергия удара может вызвать эрозию поверхности [4]–[6]. Кавитационная эрозия встречается в морской, гидравлической и экологической технике. Специалистам пока еще неизвестны материалы, способные противостоять воздействию кавитации [4], [7], [8].

Основные проблемы широкого использования кавитации в струйном потоке жидкости связаны с тем, что это не всегда управляемый и прогнозируемый процесс. Результат кавитационного воздействия на поверхность зависит от гидродинамических характеристик течения жидкости, геометрии и качества изготовления кавитатора [9]. Детальный экспериментальный анализ струйной кавитации ограничен производительностью насосных аппаратов и невозможностью испытаний множества различных комбинаций геометрии сопла или насадки. Ускорить исследование гидродинамической кавитации позволяет компьютерное моделирование струйного истечения (Computational Fluid Dynamics-CFD).

Моделирование CFD в последнее время вызвало значительный интерес и является важным инструментом для изучения эффекта обрастания и защиты от обрастания. Благодаря CFD исследована сила подъема и сопротивления морских подводных устройств с обрастающим и противообрастающим покрытием [10], выполнен прогноз влияния биообрастания на сопротивление судна [11], [12] и на характеристики гребных винтов [13].

Цель данной работы — исследовать процесс взаимодействия кавитирующей струи с биологическими обрастаниями, свойственными теплым морям.

Методы и материалы (Methods and Materials)

Задача проведения эксперимента в морских условиях заключалась в получении количественных данных для последующего численного моделирования. В эксперименте использовали судостроительную сталь марки А40S, пластины размером $4 \times 100 \times 250$ мм, одна сторона которых была окрашена двухкомпонентной акрил-уретановой эмалью с предварительной грунтовкой металла, другая — оставалась необработанной после проката. На специальном держателе образцы в три ряда были погружены в морскую воду на базе «КГМТУ» в районе Керченского пролива. Расстояние от уровня моря до первого ряда — 1 м, между рядами — 0,3 м. Продолжительность эксперимента — 8 месяцев (август – март).

На первом этапе механическое воздействие на обрастания было выполнено затопленной кавитирующей струей давлением 10 атм на входе в насадок диаметром 4 мм (рис. 1, а). На втором этапе испытание обрастания на прочность осуществлялось путем нагружения гетинаксовым цилиндром, сопряженным с аналоговым динамометром марки NK-500 (рис. 1, б). Размер указан в мм. В режиме «реак» динамометр фиксировал максимальную силу разрушения обрастания при сжатии перпендикулярно поверхности и под углом 45° .

Подробное исследование влияния кавитирующего потока выполнено методом конечно-элементного моделирования в программном комплексе ANSYS Workbench 19.1 (академическая лицензия). Модуль ANSYS CFX, интегрированный в расчетную среду ANSYS Workbench, является мощным инструментом для анализа в области вычислительной динамики жидкости, в том числе с учетом кавитации. Количественной характеристикой кавитации потока является число кавитации, определяемое следующим образом:

$$\chi = \frac{2(p - p_v)}{\rho_f v^2}, \quad (1)$$

где p — эталонное давление для потока (абсолютное давление CFD-решателя); p_v — давление насыщенного пара для жидкости при данной температуре; ρ_f — плотность жидкости; v — скорость потока.

Очевидно, что тенденция к кавитации потока увеличивается с уменьшением числа кавитации. В CFX модель Рэлея – Плессета реализована в многофазной структуре как модель межфазного массопереноса.

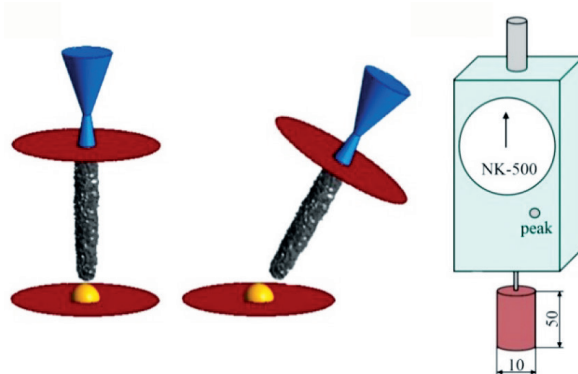


Рис. 1. Геометрия модели и направление кавитирующей струи (а); устройство измерения силы разрушения (б)

Уравнение Рэлея – Плессета, описывающее динамику осцилляций газопарового пузырька, его рост в жидкости и фазу сжатия, определяется выражением

$$R_B \frac{d^2 R_B}{dt^2} + \frac{3}{2} \left(\frac{dR_B}{dt} \right)^2 + \frac{2\sigma}{\rho_f R_B} = \frac{p_v - p}{\rho_f}, \quad (2)$$

где R_B — радиус пузырька; σ — коэффициент поверхностного натяжения между жидкостью и паром.

Уравнение (2) является следствием механического баланса при условии отсутствия тепловых барьеров для роста пузырьков. Пренебрегая членами второго порядка и поверхностным натяжением, это уравнение сводится к следующему:

$$\frac{dR_B}{dt} = \sqrt{\frac{3}{2} \frac{p_v - p}{\rho_f}}. \quad (3)$$

Скорость изменения объема пузырьков выглядит следующим образом:

$$\frac{dV_B}{dt} = \frac{d}{dt} \left(\frac{4}{3} \pi R_B^3 \right) = 4\pi R_B^2 \sqrt{\frac{3}{2} \frac{p_v - p}{\rho_f}}, \quad (4)$$

а скорость изменения массы пузырьков составляет

$$\frac{dm_B}{dt} = \rho_v \frac{dV_B}{dt} = 4\pi R_B^2 \rho_v \sqrt{\frac{3}{2} \frac{p_v - p}{\rho_f}}, \quad (5)$$

где ρ_v — плотность пара.

Если N_B — число пузырьков на единицу объема, то объемная доля r_v может быть выражена в виде

$$r_v = V_B N_B = \frac{4}{3} \pi R_B^3 N_B \quad (6)$$

и общая скорость межфазного массопереноса на единицу объема составляет

$$\dot{m}_{fv} = N_B \frac{dm_B}{dt} = \frac{3r_v \rho_v}{R_B} \sqrt{\frac{2}{3} \frac{p_v - p}{\rho_f}}. \quad (7)$$

Это выражение получено на основе предположения о росте пузырьков (испарении). Добавив конденсацию пара, можно обобщить следующим образом:

$$\dot{m}_{fv} = F \frac{3r_v \rho_v}{R_B} \sqrt{\frac{2}{3} \frac{|p_v - p|}{\rho_f}} \operatorname{sgn}(p_v - p), \quad (8)$$

где F — эмпирический фактор, который отличается для конденсации и испарения, рассчитанный с учетом того, что процессы могут происходить с разной скоростью (конденсация обычно намного медленнее, чем испарение).

В целях моделирования радиус пузырька R_B заменен на радиус области нуклеации $R_{\text{нукл}}$. Выражение (8) обобщено для испарения, но в случае конденсации, оно требует дальнейшей модификации. Испарение начинается на локальных «зародышах», чаще всего на стадии неконденсирующихся газов. Когда объемная доля пара увеличивается, их плотность должна, соответственно, уменьшаться, поскольку там меньше жидкости. Для парообразования, r_v в (8) заменяется $r_{\text{нукл}}(1 - r_v)$. Тогда

$$\dot{m}_{fg} = F \frac{3r_{\text{нукл}}(1 - r_g)\rho_g}{R_B} \sqrt{\frac{2}{3} \frac{|p_v - p|}{\rho_f}} \operatorname{sgn}(p_v - p), \quad (9)$$

где $r_{\text{нукл}}$ — объемная доля мест нуклеации.

Для построения геометрии сопла и области истечения струи выбрана программа Design Modeler, интегрированная в комплекс ANSYS Workbench 19.1. Сопло длиной $l = 30$ мм состоит из сужающегося усеченного конуса высотой 20 мм с мнимым углом у вершины 20° и расширяющегося — высотой 10 мм с углом 10° (см. рис. 1, а). Диаметр проходного отверстия — 2,5 мм. Истечение выполнено в затопленном пространстве на преграду в форме полусферы радиусом 5 мм. Направление потока перпендикулярно и под углом 45° к плоскости основания полусферы. Расстояние от среза сопла до центра основания полусферы изменялось в интервале 5–12 см. Сеточная модель, сгенерированная тетраэдрического типа, состояла из 1,35 млн элементов и 240 тыс. узлов с дополнительным сгущением ячеек на плоскости полусферы. Уменьшение размеров элементов сетки на 30 % приводило к разбросу данных $\pm 0,4$ %.

Решение задачи в CFX – Solver, основанное на конечно-объемном методе, проходило в два этапа. На первом этапе было получено сошедшееся решение с выключенной моделью кавитации, затем полученные данные импортировались в продублированный CFX-решатель, и выполнялся анализ кавитирующей струи. Начало формирования задачи в препроцессоре CFX связано с заданием материала тела основного домена и опорного давления. Для этого во вкладке «Основные настройки» (Basic Settings) выбрана вода (Material — Water) и Reference Pressure — 0,1 МПа. Особенности процесса течения жидкости, указанные во вкладке «Fluid Models», соответствуют однородной несжимаемой жидкости при изотермических условиях истечения. Температура жидкости — 25 °С. Модель турбулентности потока выбрана Shear Stress Transport (SST). SST модель хорошо рассчитывает течения как вблизи стенки, так и в остальном потоке. Она стабильна и не требует больших вычислительных ресурсов [14]. Параметры входа (Inlet) заданы в окне «Mass and Momentum», массовый расход (Bulk Mass Flow Rate) — 0,2–0,3 кг/с, статическое давление (Static Pressure) выхода (Outlet) — 0,2 МПа.

Для анализа кавитационных характеристик струи на панели «Details of Default Domain in Flow Analysis» во вкладке «Основные настройки» («Basic Setting») в поле определения жидкости и газа («Fluid and Particle Definition») добавлена область «Vapour». Материалом выбран водяной пар при 25 °С (Water Vapour at 25 °С), модель жидкости (Fluid Models) однородная (Homogeneous). Кавитация задана на вкладке «Модели жидкости и пара» («Fluid pair Models»), опция — Cavitation. Во входном сечении Inlet определена объемная доля воды (Water-1) и пара (Vapour-0). Основной диаметр пузырьков пара (Main Diameter) в уравнении Рэлея – Плессета выбран $2 \cdot 10^{-6}$ м, давление насыщенных паров (Saturation Pressure) с учетом температуры моделируемой жидкости 25 °С — $p_v = 3170$ Па. Остальные параметры моделирования, выбранные по умолчанию, считаются стандартными для большинства кавитирующих течений. Для анализа динамического и кавитационного воздействия получено распределение абсолютного давления и объемной доли паровой фазы на поверхности полусферы и вдоль линии сечения ее плоскостью с использованием функции Polyline (350 точек).

Результаты (Results)

В результате нахождения под водой на пластинах обнаружены следующие типы обрастаний: сидячие многощетинковые черви — серпулы (*Serpula vermicularis*) размером 4–12 мм с плотностью одна-две особи на 1 см², баянусы (*Chthamalus stellatus*) с диаметром домика 5–10 мм и высотой 3–5 мм (рис. 2), мшанки (*Bryozoa*) и зеленые водоросли (*Chlorophyta*).

Гидродинамическим способом, при пониженном входном давлении (до 10 атм), площадь пластин очищалась от всех типов обрастания, кроме баянуса. Этот вид — один из наиболее распространенных [10] и трудно удаляемых с корпуса судна обрастателей. Являясь разновидностью усоногих раков, баянус имеет твердую известковую ракушку, которая прикрепляется к подложке при помощи специального вещества, выдерживающего нагрев до +177 °С, замораживание до –146 °С, не трескается, не отшелушивается, не растворяется ни кислотами, ни щелочами, ни органическими растворителями.

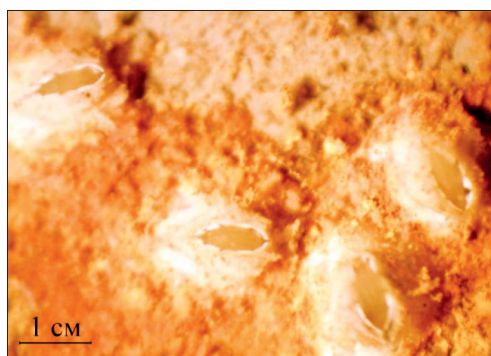


Рис. 2. Обрастание баянусом (*Chthamalus stellatus*) поверхности судостроительной стали марки А40S

При нормальном действии силы гетинаксового цилиндра результаты имели незначительный разброс и в основном зависели от размера обрастания. Для особей диаметром 4–10 мм (20 экз.) — рис. 3, эксперимент № 1 — интервал сил F составил 80–150 Н на двух типах исследуемых поверхностей. При сдвиговом воздействии F под углом 45° разрушения баянуса такого же размера (25 экз.) попадала в диапазон 25–75 Н (рис. 3, эксперимент № 2).

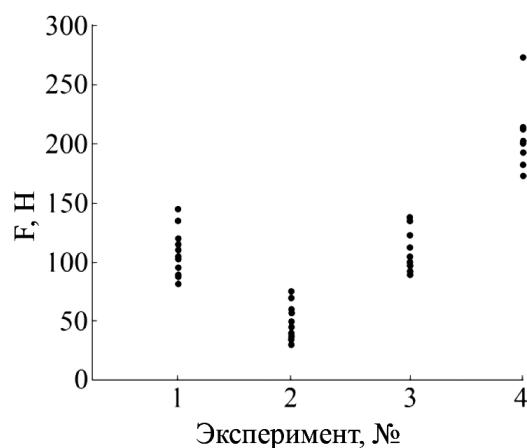


Рис. 3. Зависимость силы разрушения от способа нагружения и размеров обрастания

Снижение предельной силы можно объяснить структурой ракушки, которая состоит из сходящихся в домик пластинок. Нагрузка под углом приводит к их поочередному разрушению, для которого требуется меньшая сила, в отличие от перпендикулярного сжатия, где сила одновременно распределится на все пластины баянуса. Значение силы разрушения зависит от плотности баянуса на поверхности образца. Для отрыва двух близкорасположенных раковин она возрастает до 135 Н (15 экз.) — рис. 3, эксперимент № 3, а если речь идет об образовавшейся колонии из 3–4 экз. (см. рис. 1), то приложенная сила могла достигать 275 Н (10 экз.) — см. рис. 3, эксперимент № 4.

Давление, оказанное на оболочку в момент разрушения, составляет $p = 5\text{--}25$ МПа, что повышает требования к высоконапорным установкам для реализации подводной очистки судна. Проведенные исследования [4], [5] кавитационной эрозии неметаллических материалов в этом диапазоне давлений позволили получить экспериментальные зависимости глубины зоны эрозии h от времени τ воздействия на образец для различных значений давлений p_{in} . В диапазоне изменения времени воздействия струи на образец от 10 до 60 с зависимость $h = f(\tau)$ изменяется с достаточным приближением к линейному закону. С увеличением p_{in} тангенс угла наклона линейных зависимостей возрастает. Аналитическое выражение $h = f(\tau)$ для расстояния до преграды $l = 5$ см получено в виде

$$h = \frac{p_{in}}{10,4} \tau, \quad (10)$$

где p_{in} — давление на входе в сопло, МПа; h — глубина эрозии, см.

Использование как динамического, так и кавитационного эффекта позволяет снизить входное давление, а, следовательно, и энергозатратность насосных установок. Численный расчет выявил следующие закономерности кавитационного и силового действия струйного потока на модель обрастания. Концентрация паровой фазы в перпендикулярном поверхности потоке (см. рис. 1, а) жидкости имеет максимум по краям полусферической преграды, значение которого повышается при изменении расхода через сопло от 0,2 до 0,3 кг/с (на рис. 4, а и б обозначено 1, 2). Промежуточные расчеты с шагом 0,01 кг/с в этом интервале показали качественное сходство полученных кривых 1 и 2 на рис. 4, а. Однако рост паровой фазы на поверхности модели обрастания неравномерный и носит колебательный характер при малых изменениях расхода с общей тенденцией

к увеличению кавитационных пузырьков в исследуемой области. Это связано с вероятностным расчетом зарождения и роста пузырьков, что подтверждает вибрационное действие кавитирующей струи, которое усиливает эрозию хрупких материалов. Полное давление на входе в сопло соответствовало $p_i = 7,6$ атм при массовом расходе $0,2$ кг/с и $p_i = 18,2$ атм для $0,3$ кг/с. Величины таких порядков позволяют получить большинство коммерчески реализуемых напорных установок.

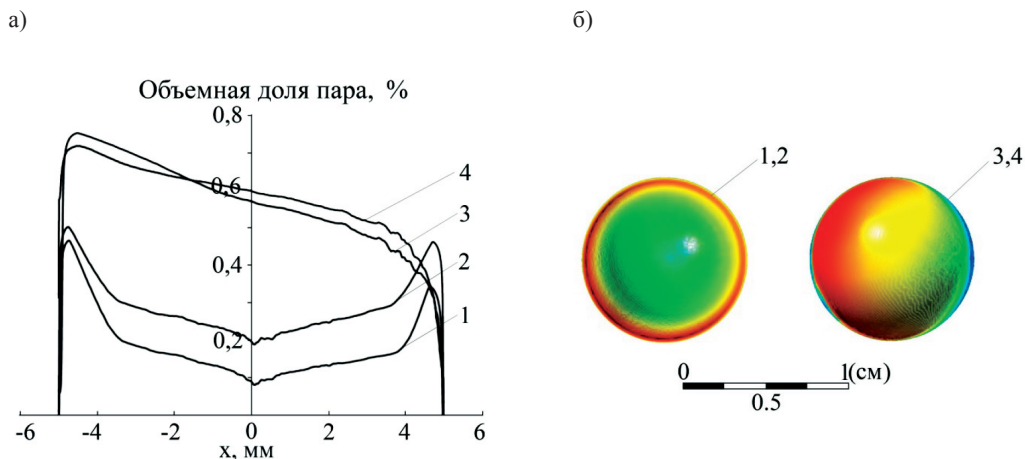


Рис. 4. Объемная доля пара в потоке жидкости в зависимости от координаты x (а) и распределения по поверхности полусферы (б):
1 — перпендикулярное направление — расход $0,2$ кг/с;
2 — расход $0,3$ кг/с (3 и 4, соответственно, под углом 45°)

Наклон струи на 45° от первоначального направления приводит к усилению кавитационного влияния по всей поверхности полусферы (рис. 4, а). Максимум объемной доли пара при этом сдвигается в противоположную сторону от расположения сопла (см. на рис. 4, б обозначено 3, 4)). Концентрация кавитационных пузырьков слабо зависит от массового расхода жидкости в интервале $0,2$ – $0,3$ кг/с, а промежуточные расчеты с шагом $0,01$ кг/с плотно укладывались около линий 3 и 4 на рис. 4, а.

Распределение абсолютного давления p_{abs} при тех же условиях истечения и расположения сопла, что и при анализе объемной доли пара, показано на рис. 5. С учетом того, что противодавление затопленного пространства в модели выбрано равным 200 кПа, во всей области струи возникает разрежение. В местах, где $p_{abs} < p_v$ — давления насыщенного пара, возникает фазовый переход с образованием кавитационных пузырьков. Максимум p_{abs} при перпендикулярном направлении потока находится в центре поверхности полусферы (см. рис. 5, линии 1 и 2), а при угле 45° сдвигается на ее передний край (см. рис. 5 линии 3 и 4)). Рост p_{abs} при увеличении массового расхода от $0,2$ до $0,3$ кг/с шагом $0,01$ кг/с — равномерный. Расстояние от сопла до поверхности полусферы $l = 5$ см. Увеличение расстояния $l = (5\text{--}12)$ см с шагом 1 см от сопла до центра преграды позволило получить следующие результаты, приведенные на рис. 6 и 7. Для перпендикулярного направления потока максимумы объемной доли паровой фазы, наблюдаемые у основания полусферы (см. рис. 4 линии 1, 2), постепенно сглаживаются и для $l = 12$ см проявляются слабо (см. рис. 6, а (линии 1, 2)). Вся поверхность преграды потоку практически равномерно покрыта кавитационными пузырьками с концентрацией 17 – 18% (см. рис. 6, б, линия 2).

Изменение расстояния l в том же интервале при наклоне кавитирующей струи на 45° показало изменение формы области паровой фазы на поверхности модели обрастания. Если $l < 9$ см, то формы кривых качественно совпадают (рис. 6, а (линия 3) и рис. 4, а (линии 3, 4)), при $l > 9$ см происходит спад (см. рис. 6 линия 4) паровой фазы на переднем крае полусферы, который усиливается с увеличением l . Изменение зависимости $p_{abs} = f(x)$ при увеличении l носит только количественный характер (рис. 7). Для массового расхода $0,2$ кг/с максимум p_{abs} уменьшается в 4 раза, при этом полное давление на входе в сопло сохраняется $7,6$ атм.

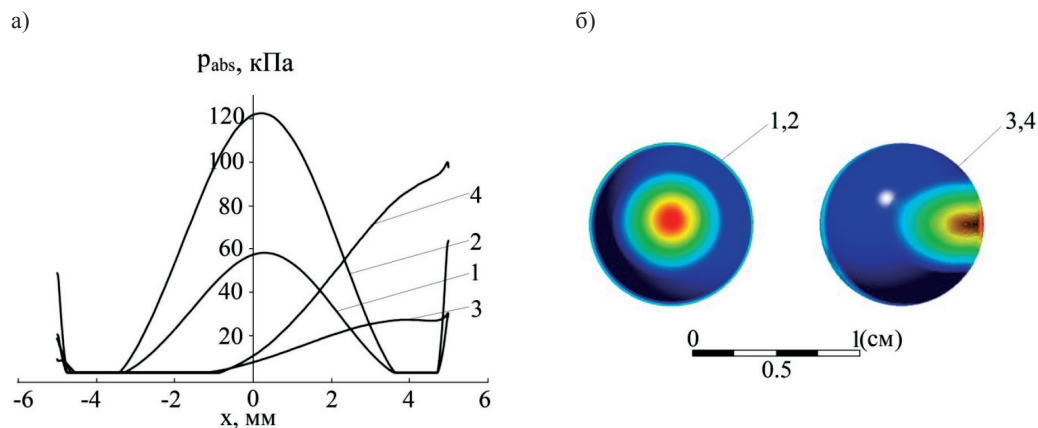


Рис. 5. График абсолютного давления в зависимости от координаты x (а) и его распределение по поверхности полусферы (б);
1 — перпендикулярное направление — расход 0,2 кг/с;
2 — расход 0,3 кг/с (3 и 4 соответственно под углом 45°)

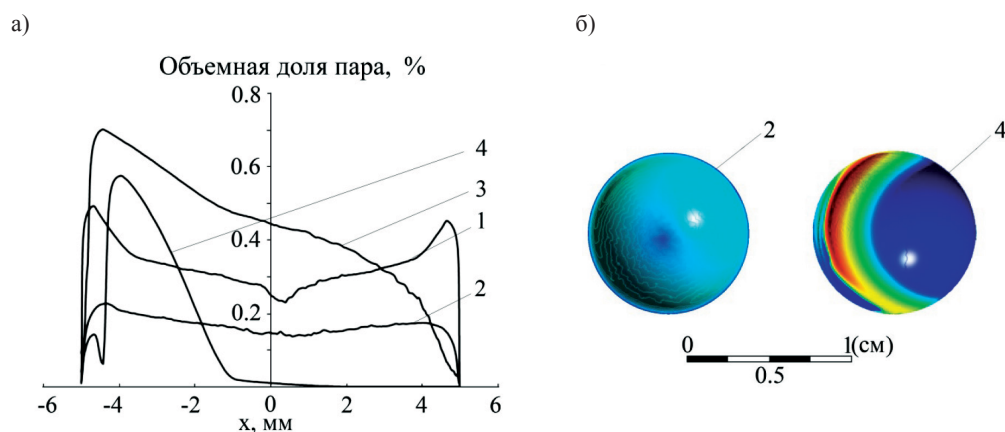


Рис. 6. Объемная доля пара в потоке жидкости в зависимости от координаты x (а) и распределение по поверхности полусферы (б);
1 — перпендикулярное направление — расстояние от сопла до поверхности полусферы 6 см;
2 — расстояние 12 см (3 и 4, соответственно, под углом 45°)

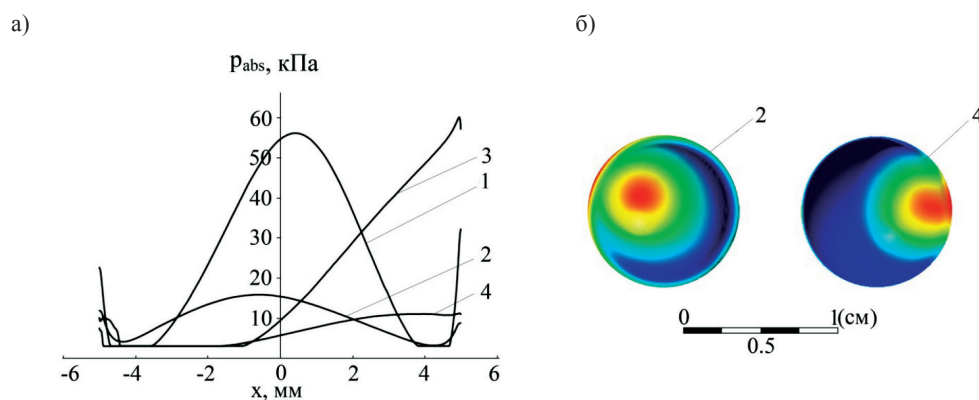


Рис. 7. График абсолютного давления в зависимости от координаты x (а) и его распределение по поверхности полусферы (б);
1 — перпендикулярное направление —
расстояние от сопла до поверхности полусферы 6 см;
2 — расстояние 12 см (3 и 4, соответственно, под углом 45°)

Обсуждение (Discussion)

Объяснить полученные результаты возможно, если подробно рассмотреть структуру кавитирующей струи. Зарождение кавитации происходит в области резкого увеличения скорости потока. Высокоскоростная струя жидкости, распространяющаяся в затопленной области при кавитационных режимах, в отличие от автомодельных струй, не является изобарической. В поперечном сечении струи профиль давлений имеет сложный вид. Образование кавитационных пузырьков происходит на незначительной площади перехода струйного потока из сходящегося участка сопла в расходящийся. Область кавитации в поперечном сечении затопленной струи имеет кольцеобразный вид. Радиусы концентрических окружностей кольца изменяются по всей ее длине. Внутренняя окружность на выходе из сопла имеет размер, соответствующий радиусу основания расходящегося конуса, затем незначительно увеличивается на начальном участке струи и остается постоянной, вплоть до быстрого исчезновения в конце кавитационного «факела». При указанных ранее параметрах диаметр внутренней окружности при моделировании изменялся от 6 мм на срезе сопла, достигал своего максимума (15 мм) и оставался постоянным в средней части струи, затем начинал уменьшаться (5 мм) с приближением к поверхности полусферы.

Внутри окружности по всей длине струи существует спад абсолютного давления по сравнению с противодавлением в затопленном пространстве. Если в данной области выполняется условие $p_{abs} < p_v$, то происходит зарождение кавитационных пузырьков, однако концентрация их будет ниже, чем за пределами внутренней полости. Это подтверждается зависимостями объемной доли пара от координаты x на рис. 4 (линии 1, 2) и рис. 6 (линия 1). Удаление сопла от преграды приводит к дальнейшему уменьшению радиуса внутренней окружности до полного отсутствия различия в сечении струи рис. 6 (линия 2).

Внешняя окружность кольца области кавитации главным образом определяет форму всего кавитационного «факела». Для выбранных параметров истечения ее радиус в средней части струи колебался в пределах 22–25 мм, а объемная доля паровой фазы была не ниже 70 %, что 1,5–2 раза больше, чем внутри струи. Таким образом, тела, размером менее 5 мм, при перпендикулярном воздействии попадали под действие внутренней части кавитирующей струи и испытывали растягивающие напряжения с кавитационным эффектом, который усиливался в основном за пределами полусферы или частично затрагивал ее края.

Сдвиг струи под 45° существенно увеличил объемную долю паровой фазы на поверхности исследуемой модели, поскольку преграда в данном случае попадала в кольцо максимальной кавитации (см. рис. 4 (линии 3 и 4) и рис. 6 (линия 3)). Левее центра полусферы теперь находилась центральная ось струи, а в правую сторону происходил постепенный спад кавитации (см. рис. 4, б (линии 3 и 4)). При увеличении расстояния и сокращении радиуса кольца кавитации ближе к концу струи наблюдалось полное прекращение кавитационного воздействия, так как поверхность образца уходит из-под влияния кавитирующей струи (см. рис. 6, б (линия 4)).

Заключение (Conclusion)

Выполненный эксперимент по обрастанию поверхности судостроительной стали в естественных морских условиях определил основные виды организмов, которые способны прикрепляться в теплых морях в течение выбранного времени испытания. Оценка биомеханических свойств этих обрастаний количественно установила требования к инструменту их разрушения и удаления с поверхности. Использование аппаратов высокого давления подтвердило целесообразность применения комплексного кавитационного и динамического воздействия. Однако сложности в эксплуатации, невысокая рентабельность и безопасность ограничивают этот метод при очистке в открытом море. Дальнейшее развитие кавитационная технология может получить в случае ее реализации при пониженном давлении (≈ 1 МПа). Численное моделирование подобных процессов показало реальную возможность получения хорошо развитой кавитации на поверхности тела обрастания. Только при таких условиях увеличивается зависимость эффективности очистки от длины и ориентации кавитирующей струи, что, в меньшей степени, проявляется при использовании высоких

давлений (>10 МПа). Эта связь, обусловленная внутренней структурой кавитационного потока, должна учитываться при составлении рекомендаций по использованию оборудования для подводной очистки. Однако успешное выполнение указанных требований главным образом зависит от квалификации водолаза и его способности следовать разработанной методике. С другой стороны, использование пониженного давления способствует внедрению малогабаритных устройств и открывает путь к максимальной роботизации процесса, позволяет выполнить переход на погружные насосы или использование мотопомп, снизить массу крепления кавитаторов к поверхности корпуса судна и их соединений с насосной установкой, делает возможным создание автоматических комплексов очистки конструкций под водой.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Звягинцев А. Ю. Морское обрастание в северо-западной части Тихого океана / А. Ю. Звягинцев. — Владивосток: Дальнаука, 2005. — 432 с.
2. Drake J. M. Hull fouling is a risk factor for intercontinental species exchange in aquatic ecosystems / J. M. Drake, D. M. Lodge // *Aquatic Invasions*. — 2007. — Vol. 2. — Is. 2. — Pp. 121–131. DOI: 10.3391/ai.2007.2.2.7.
3. Li Y. Latest research progress of marine microbiological corrosion and bio-fouling, and new approaches of marine anti-corrosion and anti-fouling / Y. Li, C. Ning // *Bioactive materials*. — 2019. — Vol. 4. — Pp. 189–195. DOI: 10.1016/j.bioactmat.2019.04.003.
4. Родионов В. П. Струйная суперкавитационная эрозия / В. П. Родионов. — Краснодар: ГОУВПО КубГТУ, 2005. — 223 с.
5. Родионов В. П. Закономерности кавитационной эрозии конструкционных материалов / В.П. Родионов, А. И. Уколов // *Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки*. — 2017. — Т. 44. — № 3. — С. 39–47. DOI: 10.21822/2073-6185-2017-44-3-39-47.
6. Cheng F. Cavitation bubbles dynamics and cavitation erosion in water jet / F. Cheng, W. Ji, C. Qian, J. Xu // *Results in Physics*. — 2018. — Vol. 9. — Pp. 1585–1593. DOI: 10.1016/j.rinp.2018.05.002.
7. Шестоперов В. Ю. Кавитационное разрушение материалов и критерии оценки их эрозионной стойкости / В.Ю. Шестоперов // *Труды НГТУ им. П. Е. Алексеева*. — 2013. — № 5 (102). — С. 79–83.
8. Momber A. W. Short-time cavitation erosion of concrete / A.W. Momber // *Wear*. — 2000. — Vol. 241. — Is. 1. — Pp. 47–52. DOI: 10.1016/S0043-1648(00)00348-3.
9. Уколов А. И. Моделирование дефекта внутренней поверхности струйного кавитатора / А.И. Уколов, В.П. Родионов // *Вестник Донского государственного технического университета*. — 2018. — Т. 18. — № 2. — С. 146–156. DOI: 10.23947/1992-5980-2018-18-2-146-156.
10. Khor Y. S. CFD simulations of the effects of fouling and antifouling / Y.S. Khor, Q. Xiao // *Ocean Engineering*. — 2011. — Vol. 38. — Is. 10. — Pp. 1065–1079. DOI: 10.1016/j.oceaneng.2011.03.004.
11. Demirel Y. K. Predicting the effect of biofouling on ship resistance using CFD / Y.K. Demirel, O. Turan, A. Incecik // *Applied Ocean Research*. — 2017. — Vol. 62. — Pp. 100–118. DOI: 10.1016/j.apor.2016.12.003.
12. Demirel Y. K. A CFD model for the frictional resistance prediction of antifouling coatings / Y. K. Demirel, M. Khorasanchi, O. Turan, A. Incecik, M. P. Schultz // *Ocean Engineering*. — 2014. — Vol. 89. — Pp. 21–31. DOI: 10.1016/j.oceaneng.2014.07.017.
13. Owen D. Investigating the effect of biofouling on propeller characteristics using CFD / D. Owen, Y.K. Demirel, E. Oguz, T. Tezdogan, A. Incecik // *Ocean Engineering*. — 2018. — Vol. 159. — Pp. 505–516. DOI: 10.1016/j.oceaneng.2018.01.087.
14. Калимуллин Р. Р. Выбор модели турбулентности при моделировании вихревого течения жидкости в теплогенераторе / Р. Р. Калимуллин, Е. М. Яминова, Н. В. Шестерякова // *Гидравлика*. — 2016. — № 1 (1). — С. 60–66.

REFERENCES

1. Zvyagintsev, A. Yu. *Morskoe obrastanie v severo-zapadnoi chasti Tikhogo okeana*. Vladivostok: Dal'nauka, 2005.
2. Drake, John M., and David M. Lodge. "Hull fouling is a risk factor for intercontinental species exchange in aquatic ecosystems." *Aquatic Invasions* 2.2 (2007): 121–131. DOI: 10.3391/ai.2007.2.2.7.

3. Li, Yangfan, and Chengyun Ning. "Latest research progress of marine microbiological corrosion and bio-fouling, and new approaches of marine anti-corrosion and anti-fouling." *Bioactive materials* 4 (2019): 189–195. DOI: 10.1016/j.bioactmat.2019.04.003.
4. Rodionov, V. P. *Struinaya superkavitatsionnaya eroziya*. Krasnodar: GOUVPO KubGTU, 2005.
5. Rodionov, Victor P., and Alexey I. Ukolov. "The laws of cavitation erosion of construction materials." *Herald of Dagestan State Technical University. Technical Sciences* 44.3 (2017): 39–47. DOI: 10.21822/2073-6185-2017-44-3-39-47.
6. Cheng, Feng, Weixi Ji, Chenhao Qian, and Jie Xu. "Cavitation bubbles dynamics and cavitation erosion in water jet." *Results in Physics* 9 (2018): 1585–1593. DOI: 10.1016/j.rinp.2018.05.002
7. Shestoporov, V. Yu. "Cavitation damage of materials and criteria for assessing the erosion resistance." *Trudy Nizhegorodskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. R.E. Alekseeva* 5(102) (2013): 79–83.
8. Momber, Andreas W. "Short-time cavitation erosion of concrete." *Wear* 241.1 (2000): 47–52. DOI: 10.1016/S0043-1648(00)00348-3.
9. Ukolov, Alexey I., and Victor P. Rodionov. "Modeling the inside defect of the jet cavitator." *Vestnik of Don State Technical University* 18.2 (2018): 146–156. DOI: 10.23947/1992-5980-2018-18-2-146-156.
10. Khor, Yee Shin, and Qing Xiao. "CFD simulations of the effects of fouling and antifouling." *Ocean Engineering* 38.10 (2011): 1065–1079. DOI: 10.1016/j.oceaneng.2011.03.004.
11. Demirel, Yigit Kemal, Osman Turan, and Atilla Incecik. "Predicting the effect of biofouling on ship resistance using CFD." *Applied Ocean Research* 62 (2017): 100–118. DOI: 10.1016/j.apor.2016.12.003.
12. Demirel, Yigit Kemal, Mahdi Khorasanchi, Osman Turan, Atilla Incecik, and Michael P. Schultz. "A CFD model for the frictional resistance prediction of antifouling coatings." *Ocean Engineering* 89 (2014) 21–31. DOI: 10.1016/j.oceaneng.2014.07.017.
13. Owen, David, Yigit Kemal Demirel, Elif Oguz, Tahsin Tezdogan, and Atilla Incecik. "Investigating the effect of biofouling on propeller characteristics using CFD." *Ocean Engineering* 159 (2018): 505–516. DOI: 10.1016/j.oceaneng.2018.01.087.
14. Kalimullin, R.R., E.M. Yaminova, and N.V. Shesteryakova. "The choice of turbulence model in the simulation of the vortex flow fluid in the heat generator." *Hydraulics* 1(1) (2016) 60–66.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Уколов Алексей Иванович —
кандидат физико-математических наук, доцент
ФГБОУ ВО «Керченский государственный
морской технологический университет»
298309, Российская Федерация, г. Керчь,
ул. Орджоникидзе, 82
e-mail: ukolov_aleksei@mail.ru

Родионов Виктор Петрович —
доктор технических наук, доцент
ФГБОУ ВО «Керченский государственный
морской технологический университет»
298309, Российская Федерация, г. Керчь,
ул. Орджоникидзе, 82
e-mail: vik-rodio@yandex.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Ukolov, Aleksey I. —
PhD, associate professor
Kerch State Maritime
Technological University
82 Ordzhonikidze Str., Kerch, 298309,
Russian Federation
e-mail: ukolov_aleksei@mail.ru

Rodionov, Victor P. —
Dr. of Technical Sciences, associate professor
Kerch State Maritime
Technological University
82 Ordzhonikidze Str., Kerch, 298309,
Russian Federation
e-mail: vik-rodio@yandex.ru

Статья поступила в редакцию 29 октября 2019 г.

Received: October 29, 2019.

DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-6-1107-1114

EXPERIMENTAL STUDY OF THE THERMOPHYSICAL PROPERTIES OF BIMETALLIC BEARING MATERIALS FOR MARINE ENGINEERING

R. V. Kuznetsov¹, E. O. Olkhovik²

¹ — PJSC, Zvezda, St. Petersburg, Russian Federation

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

The subject of the study is the thermophysical properties of the Al-Fe bimetallic compound obtained by the joint stamping method of liquid metal. The object of the study is the corpus products of marine engineering, which are pumps and hydraulic equipment from commercial Al-Si-Mg alloy with bearing bushings obtained from sintered powder iron. The creation of equipment, laboratory and methodological foundations for the study of thermal processes in the formation of Al-Fe bimetallic compound under stamping pressure is considered in the paper. The method of differential thermal analysis is selected as the main laboratory method for studying thermal processes in the manufacture of a bimetallic compound by liquid metal stamping method, because it provides a relevant study of the temperature parameters of the technological process. The essence of the method is to measure the temperature of the solidifying aluminum alloy, powder bush and technological rigging during the formation of the bimetallic compound. A set of thermocouples, special digital drivers and a microcontroller, which transfers all the information for storage and analysis to a personal computer with a resolution of 1 second, are used to implement the measurements. Several thermal graphs that corresponded to various technological parameters (temperature, pressure) are obtained in the experiments. Comparison with the results of similar studies has showed that a stable adhesive compound is formed due to the mechanical interdiffusion of metals and filling of the bulk pores in the powder bush with liquid aluminum or due to the formation of a thin diffusion zone, followed by the implementation of a metallurgical compound. The various thermal regimes of the bimetallic compound solidification are investigated at the developed laboratory setup; it has been revealed that the stamping pressure significantly affects the formation of contact between metals, and allows creating a stable adhesive connection.

Keywords: marine engineering, Al-Fe bimetallic alloy, thermophysical properties, differential thermal analysis.

For citation:

Kuznetsov, Ruslan V., and Evgeniy O. Olkhovik. "Experimental study of the thermophysical properties of bimetallic bearing materials for marine engineering." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 11.6 (2019): 1107–1114. DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-6-1107-1114.

УДК 621.77

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ МАТЕРИАЛОВ БИМЕТАЛЛИЧЕСКОГО ПОДШИПНИКА ДЛЯ СУДОВОГО МАШИНОСТРОЕНИЯ

Р. В. Кузнецов¹, Е. О. Ольховик²

¹ — ПАО «Звезда», Санкт-Петербург, Российская Федерация

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

Предметом исследования являются теплофизические свойства биметаллического соединения Al-Fe, получаемого методом совместной штамповки жидкого металла. Объектом исследования являются корпусные изделия судового машиностроения — насосы и гидравлическое оборудование из коммерческого алюминиевого сплава АК9ч с подшипниковыми втулками, полученными из спеченного порошкового железа. В статье рассматривается создание техники, лабораторных и методических основ для изучения тепловых процессов при формировании биметаллического соединения Al-Fe в условиях давления штамповки. Основным лабораторным методом для исследования тепловых процессов при изготовлении биметаллического соединения

методом штамповки жидкого металла был выбран метод дифференциального термического анализа, обеспечивающий релевантное изучение температурных параметров технологического процесса. Суть метода заключалась в измерении температуры затвердевающего алюминиевого сплава, порошковой втулки и технологической оснастки в период формирования биметаллического соединения. Для реализации измерений использовался набор термпар, специальные цифровые драйверы и микроконтроллер, который передавал всю информацию для хранения и анализа в персональный компьютер с дискретностью в 1 с. В экспериментах было получено несколько термических кривых, которые соответствовали различным технологическим параметрам (температура, давление). Сравнение с результатами подобных исследований показало, что устойчивое адгезионное соединение формируется или за счет механического перемешивания металлов и заполнения объемных пор в порошковой втулке жидким алюминием, или за счет образования тонкой диффузионной зоны с последующей реализацией металлургического соединения. На разработанной лабораторной установке были исследованы различные тепловые режимы затвердевания биметаллического соединения и выявлено, что давление штамповки оказывает существенное влияние на формирование контакта между металлами, позволяя создать устойчивое адгезионное соединение.

Ключевые слова: судовое машиностроение, биметаллический сплав Al-Fe, теплофизические свойства, дифференциальный термический анализ.

Для цитирования:

Кузнецов Р. В. Экспериментальное исследование теплофизических свойств материалов биметаллического подшипника для судового машиностроения / Р. В. Кузнецов, Е. О. Ольховик // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2019. — Т. 11. — № 6. — С. 1107–1114. DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-6-1107-1114.

Введение (Introduction)

Разработка и технологическое проектирование производства биметаллических изделий для судового машиностроения — новая научная задача, не имеющая в настоящее время полного решения. Синтез сплавов на основе алюминия и железа — достаточно известная научная область [1] с применением современных технологий их получения, в том числе способом трехмерной печати (аддитивные технологии) [2], методом послойного лазерного спекания и заготовительными технологиями тиксолития [3], реолития [4] и др. Однако существенным недостатком таких технологий является необходимость использования специально подготовленных сплавов или порошковых материалов, заготовка и производство которых является отдельной отраслью. Применение коммерческих алюминиевых и железных сплавов в данных технологиях невозможно, что существенно ограничивает коммерческую привлекательность готовых изделий судового машиностроения.

В работах [5]–[8] предложены различные технологии получения биметаллического соединения Al-Fe на этапе заготовительного производства — это совместная плавка [5], магнитно-импульсная [6] и контактная [7] сварка, штамповка жидкого металла [8], металлматричные технологии [9] с дисперсионным упрочнением и др. Во всех вариантах технологий главной задачей является создание соединения с высокой адгезионной прочностью на границе двух металлов, как показано в работе [8]. Структурный механизм такого соединения может быть вариативным, от механического перемешивания и взаимного проникновения до химического взаимодействия металлов с образованием интерметаллидных фаз.

Предметом исследования являются теплофизические свойства биметаллического сплава Al-Fe, получаемого методом совместной штамповки жидкого металла. Объектом исследования являются корпусные изделия судового машиностроения — насосы и гидравлическое оборудование из коммерческого алюминиевого сплава АК9ч с подшипниковыми втулками, полученными из спеченного порошкового железа АНС 100.29.

Основными параметрами технологического процесса получения биметаллического соединения Al-Fe являются температурные поля, формирующиеся как в металлах, так и в технологической оснастке при затвердевании основного металла.

Целью работы является создание техники, лабораторных и методических основ для изучения тепловых процессов при формировании биметаллического соединения Al-Fe при использовании метода штамповки жидкого металла.

Измеренные температурные условия затвердевания алюминиевого сплава АК9ч в условиях контакта с порошковой заготовкой из железа и при воздействии давления позволят выявить технологические параметры процесса изготовления биметаллического подшипника для корпусов насоса и другого гидравлического оборудования для судового машиностроения.

Методы и материалы (Methods and Materials)

В данной работе в качестве материала основы (основного металла в биметаллическом соединении) использовался коммерческий алюминиевый сплав АК9ч (Al — 87–91 %; Si — 8–10 %; Fe — до 1 %; остальные элементы < 3 %), а в качестве материала подшипника — АНС100.29 (Fe — основа; С — не более 0,025 %, окислы — не более 0,2 %) — порошковый материал, предварительно спрессованный в цилиндрическую заготовку диаметром 20–50 мм и высотой до 50 мм, пористость втулки — 15 %.

Выполненный анализ библиографических источников не выявил подробных данных о теплофизических свойствах сплавов Al-Fe, порошкового материала АНС 100.29 и интерметаллидов AlFe. Поэтому в качестве предварительных данных было принято, что основные теплофизические свойства биметалла (теплоемкость, теплопроводность и плотность) близки к свойствам сплава АК9ч. Также следует отметить, что теплофизические свойства исходного порошкового материала АНС 100.29 плохо изучены, производители порошков предлагают только примерные модельные данные, которые могут значительно отличаться в зависимости от технологии изготовления (прессования и спекания) заготовки и от ее конечной плотности (пористости). Можно предположить, что конечные теплофизические свойства спеченной порошковой втулки близки к свойствам чистого железа. Так, теплоемкость чистого железа как основного материала биметаллической заготовки по имеющимся данным может значительно изменяться от 0,3 до 0,7 [кДж/(кг·К)], т. е. более чем в 2 раза в диапазоне температур от комнатной до температуры жидкого алюминия. Теплопроводность чистого железа также изменяется от 80 до 40 [Вт/(м·К)] в диапазоне температуры затвердевания алюминиевого сплава АК9ч. Воздействие давления [10] положительно сказывается на конечных свойствах литых алюминиевых сплавов — происходит повышение плотности строения детали, отсутствует усадочная и газовая пористость, измельчается структура и, как результат, повышаются механические свойства и конструктивная прочность изделия.

Основным лабораторным методом исследования тепловых процессов при изготовлении биметаллического соединения методом штамповки жидкого металла был выбран *метод дифференциального термического анализа*, поскольку он обеспечивает релевантное изучение температурных параметров технологического процесса. Непосредственно методика заключалась в определении изменения температуры основного материала (алюминиевый сплав АК9ч) и материала порошковой заготовки в процессе получения биметаллического соединения.

Измерение температуры проводили с помощью специально разработанной лабораторной установки (рис. 1), измерительная часть которой включала: микроконтроллер Arduino Nano, два цифровых драйвера термодпары MAX6675 и две термодпары типа ТХА (ГОСТ 8.585–2001) с диаметром сая электродов 0,5 мм — рис. 2. При необходимости количество драйверов и термодпар может быть увеличено до четырех. Диапазон измеряемых лабораторной установкой температур от –40 до +1000 °С. Измерение температуры производилось термодпарами с периодом в 1 с и через драйверы передавалось на микроконтроллер, а далее по интерфейсу на персональный компьютер для хранения в текстовом формате *.csv (*.txt), обработка которого возможна средствами программного обеспечения Microsoft Excel.

Методика проведения эксперимента включала несколько этапов. Для проведения штамповки жидкого алюминия использовалась неразъемная металлическая матрица с внутренним диаметром 61 мм и высотой $H = 60$ мм. В качестве материала основы использовали литейный доэвтектический силумин марки АК9ч (ГОСТ1583–93). В качестве заготовки подшипника использовали цилиндрическую заготовку диаметром 25 и $h = 24,5$ мм из порошкового материала АНС100.29 предварительно спрессованного с объемной пористостью в 15 %. Термодпара № 1 помещалась в центр

порошковой заготовки, термопара № 2, обработанная противопригарным составом (жидкое стекло и мелкая фракция оксидов кремния) фиксировала температуру на расстоянии $2/3$ внутреннего радиуса матрицы. При необходимости расположение термопар можно изменить, а их количество увеличить.

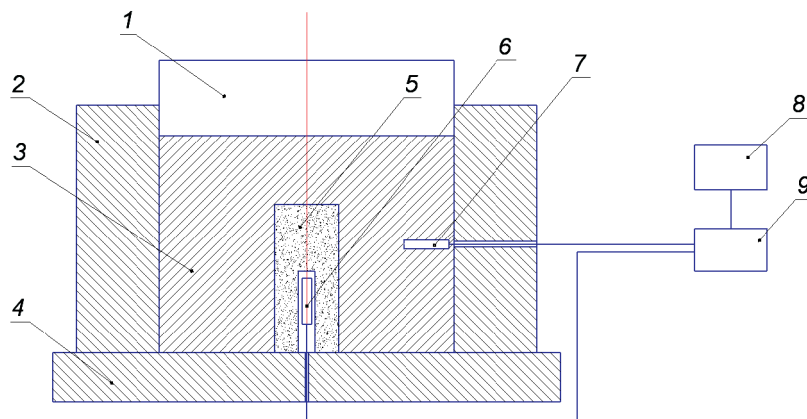


Рис. 1. Разработанная лабораторная установка для исследования тепловых параметров технологического процесса при изготовлении биметаллических заготовок в процессе штамповки жидкого металла методом дифференциального термического анализа: 1 — пуансон; 2 — неразъемная матрица; 3 — жидкий металл (АК9ч); 4 — нижняя плита; 5 — порошковая заготовка; 6, 7 — термопары; 8 — ПК; 9 — модуль сбора данных

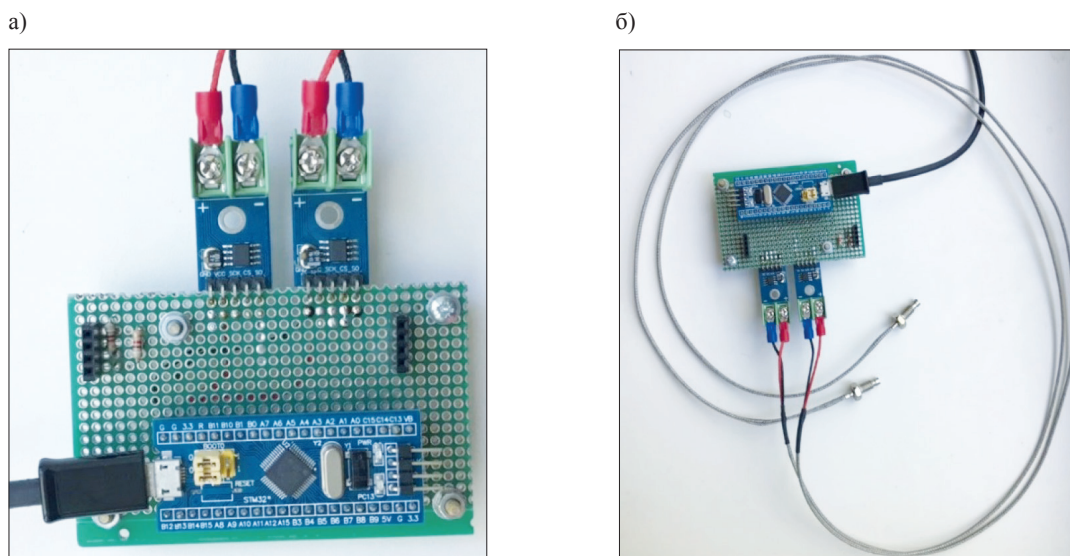


Рис. 2. Микроконтроллер Arduino Nano (а), два цифровых драйвера термопары MAX6675 и две термопары типа ТХА (б)

Подготовку расплава осуществляли в лабораторной методической печи сопротивления СНОЛ 1.6.2.5.1/11-И2. Температура заливки металла составляла $T_{\text{очн}} = (750 \pm 50) ^\circ\text{C}$. Температура штамповой оснастки была постоянной — $T_{\text{очн}} = (500 \pm 25) ^\circ\text{C}$. Данные термопар фиксировали изменение температуры в условиях свободной заливки и с применением постоянного давления в диапазоне $P_{\text{ш}} = (50 - 200 \pm 10) \text{ МПа}$.

Результаты (Results)

Основными результатами исследования являются термические кривые затвердевания биметаллического сплава в зонах алюминия и порошковой втулки, представленные на рис. 3.

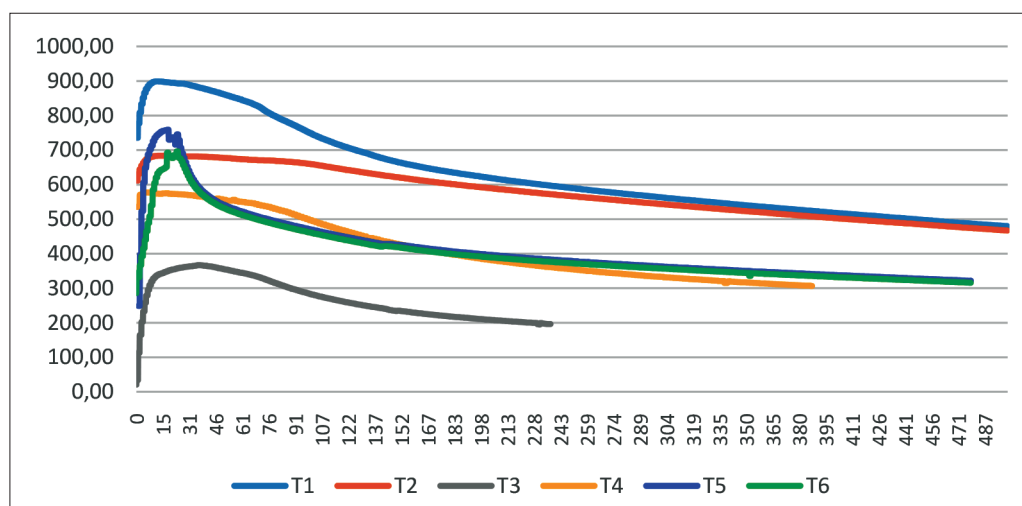


Рис. 3. Экспериментальные термические кривые охлаждения основного алюминиевого сплава (T1, T4, T5) при различной температуре заливки и порошковой втулки (T2, T3, T6) в различных условиях воздействия давления при штамповке жидкого металла (вертикальная ось графика — температура, горизонтальная — время, с)

Первый эксперимент — кривая T1 соответствовала сильному перегреву АК9ч перед заливкой в матрицу, максимальная температура достигала 900 °C, порошковая втулка (график T2) прогрелась внутри до 700 °C. Данный эксперимент проводился без воздействия давления штамповки жидкого металла (свободная заливка), последующий осмотр образца выявил, что плотного контакта между алюминием и порошковой втулкой не произошло, визуально был обнаружен зазор, который препятствовал теплообмену между металлами.

Второй эксперимент — кривая T4 соответствовала стандартной плавке сплава АК9ч перед заливкой в матрицу, максимальная температура достигала 600 °C, порошковая втулка (график T3) прогрелась внутри до 370 °C, данный эксперимент проводился в условиях среднего давления (50 МПа) штамповки жидкого металла, последующий осмотр образца выявил, что плотного контакта между алюминием и порошковой втулкой также не произошло, усадочный зазор между металлами был меньше, чем при свободной заливке, но также не позволил образовать надежную адгезионную связь.

Третий эксперимент — графики T5, T6 проводился при максимальном давлении штамповки жидкого металла (200 МПа), оснастка матрицы и порошковая втулка были предварительно разогреты до 300 °C, температура заливки АК9ч была стандартной. Образованный биметалл имел хорошую зону контакта, без каких-либо зазоров, адгезионные свойства соединения — высокие.

Термические кривые в двух первых экспериментах имели сходный характер, разогретый алюминий мгновенно прогрел порошковую втулку и далее плавно остывал до полного затвердевания, избыточное тепло переходило в матрицу, теплообмен с железной втулкой был ограничен из-за усадочного зазора, сама втулка также плавно остывала, температурное поле становилось равномерным примерно после 3 мин затвердевания.

В третьем эксперименте, при наличии давления штамповки и разогретой оснастке, температура алюминия и порошковой втулки сравнялась в течение 30–40 с, что свидетельствует о хорошем контакте между материалами, при этом общая скорость затвердевания значительно выросла.

Обсуждение результатов (Discussion of Results)

Сравнивая полученные результаты с данными работы [11], [12], можно выявить, что давление штамповки позволяет сформировать надежный контакт между металлами, а при условии сохранения такого контакта при высокой температуре, соответствующей твердожидкому состо-

янию алюминиевого сплава в течение 2–3 мин формируется устойчивое адгезионное соединение согласно следующим механизмам:

– за счет механического перемешивания металлов и заполнения объемных пор в порошковой втулке жидким алюминием;

– за счет образования тонкой диффузионной зоны с последующей реализацией металлургического соединения;

В обоих случаях требуется перегрев основного металла (АК9ч), подогрев порошковой втулки для их начального «схватывания» и разогрев технологической оснастки. В случае недостатка температуры перегрева происходит быстрое затвердевание алюминиевой основы, а за счет значительной разницы в коэффициентах температурного расширения — разрыв адгезионной связи ввиду неполного контакта между металлами. Это также подтверждается результатами исследования [13], где в качестве технологического процесса была выбрана стыковая лазерная сварка пластин из алюминия и стали, по данным анализа микростроения и механических испытаний. Авторами исследования было выявлено, что в зонах, где явно наблюдался направленный температурный градиент затвердевания без постоянного контакта двух металлов, адгезионные и механические свойства были снижены, а в зонах, где были выявлены интерметаллиды и наблюдался хороший контакт между металлами, эти свойства сохранялись на высоком уровне.

Выводы (Summary)

1. Задача получения биметаллического подшипникового узла на этапе заготовительного производства является новой для судового машиностроения и требует изучения физических, в т.ч. тепловых процессов, влияющих на конечные свойства изделия, главное из которых — надежное адгезионное соединение.

2. Тепловые процессы — основной технологический фактор, оказывающий влияние на качественные характеристики подшипникового узла, получаемого в процессе штамповки жидкого металла с использованием порошковых заготовок (втулок).

3. На разработанной лабораторной установке в результате исследования различных тепловых режимов затвердевания биметаллического соединения было выявлено, что давление штамповки оказывает существенное влияние на формирование контакта между металлами, позволяя создать устойчивое адгезионное соединение.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Проничев Д. В. Исследование коррозионной стойкости биметалла АД1+Ст3 / Д. В. Проничев [и др.] // Известия Волгоградского государственного технического университета. — 2015. — № 5 (160). — С. 24–28.

2. Захаров В. В. Алюминиевые сплавы для аддитивных технологий / В. В. Захаров // Технология легких сплавов. — 2017. — № 4. — С. 32–36.

3. Семёнов Б. И. Тиксоштамповка и тиксолитье — современные технологии формообразования алюминиевых и других сплавов в твердожидком состоянии / Б. И. Семёнов [и др.] // Технология легких сплавов. — 2010. — № 31. — С. 129–150.

4. Семенченко А. И. Технология центробежного реолитье алюминиевых сплавов / А. И. Семенченко [и др.], // Процессы литья. — 2015. — № 2. — С. 24–33.

5. Sunderraj A. J. D. SEM and EDAX Evaluation of Al-Fe Alloy / A. J. D. Sunderraj, A. V. K. Geethan, D. Ananthapadmanaban // International Journal of Engineering and Advanced Technology. — 2019. — Vol. 9. — Is. 1. — Pp. 2651–2654. DOI: 10.35940/ijeat.A9881.109119.

6. Geng H. Formation Mechanism of Transition Zone and Amorphous Structure in Magnetic Pulse Welded Al-Fe Joint / H. Geng, J. Mao, X. Zhang, G. Li, J. Cui // Materials Letters 245 (2019): 151–154. DOI: 10.1016/j.matlet.2019.02.118.

7. Wei M. Microstructure and bonding strength of tin-based Babbitt alloy on ASTM 1045 steel by MIG arc brazing / M. Wei, K. Sun, X. Zhang, C. Zhang, Z. Chen, J. Zhou, F. Xue // Journal of Adhesion Science and Technology. — 2018. — Vol. 32. — Is. 19. — С. 2150–2161. DOI: 10.1080/01694243.2018.1464239.

8. Кузнецов Р. В. Исследование физических процессов формирования адгезионной прочности биметаллического подшипника для судового машиностроения / Р. В. Кузнецов, Е. О. Ольховик // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2019. — Т. 11. — № 5. — С. 902–909. DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-5-902-909.

9. Гращенков Д. В. Высокотемпературные металломатричные композиционные материалы, армированные частицами и волокнами тугоплавких соединений / Д. В. Гращенков, И. Ю. Ефимочкин, А. Н. Большакова // Авиационные материалы и технологии. — 2017. — № 5. — С. 318–328. DOI: 10.18577/2071-9240-2017-0-S-318-328.

10. Борисов Г. П. О роли давления при формировании высококачественных алюминиевых отливок / Г. П. Борисов, А. И. Семенченко // Литейное производство. — 2009. — № 5. — С. 25–33.

11. Сосенушкин Е. Н. Технологические режимы жидкой штамповки алюминиевого сплава АК7 / Е. Н. Сосенушкин [и др.] // Цветные металлы. — 2018. — № 11. — С. 83–88. DOI: 10.17580/tsm.2018.11.12.

12. Wang H. Interfacial Microstructures and Mechanical Properties of Friction Welded Al/steel Dissimilar Joints / H. Wang, G. Qin, P. Geng, X. Ma // Journal of Manufacturing Processes. — 2020. — Vol. 49. — Pp. 18–25. DOI: 10.1016/j.jmapro.2019.11.009.

13. Cui L. Joining 6 mm Thick Dissimilar steel/Al Alloy Butt Joints using Two Keyhole Laser-MIG Hybrid Welding Processes / L. Cui, F. Pan, D. He, L. Chen // Journal of Laser Applications. — 2018. — Vol. 30. — No. 3. — Pp. 032418. DOI: 10.2351/1.5040649.

REFERENCES

1. Pronichev, D. V., L. M. Gurevich, M. D. Trunov, and V. M. Yastrebov. “Issledovanie korrozionnoi stoikosti bimetallo AD1+ St3.” *Izvestiya Volgogradskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* 5(160) (2015): 24–28.

2. Zakharov, V. V. “Aluminium Alloys for Additive Technologies.” *Tekhnologiya legkikh splavov* 4 (2017): 32–36.

3. Semenov, B. I., Yu. A. Bocharov, K. M. Kushtarov, Yu. A. Gladkov, and L. V. Khizhnyakova. “Tiksoshtampovka i tiksolit’e — sovremennye tekhnologii formoobrazovaniya alyuminievykh i drugikh splavov v tverdozhidkom sostoyanii.” *Tekhnologiya legkikh splavov* 31 (2010): 129–150.

4. Semenchenko, A. I., V. M. Duka, I. V. Khvostenko, V. Yu. Sheigam, A. G. Vernidub, and L. K. Shenevid’ko. “Tekhnologiya tsentrobezhnogo reolit’ya alyuminievykh splavov.” *Protsessy lit’ya* 2 (2015): 24–33.

5. Sunderraj, Arthur Jebastine D., Geethan K. Arun Vasantha, and D. Ananthapadmanaban. “SEM and EDAX Evaluation of Al-Fe Alloy.” *International Journal of Engineering and Advanced Technology* 9.1 (2019): 2651–2654. DOI: 10.35940/ijeat.A9881.109119.

6. Geng, Huihui, Jingqi Mao, Xu Zhang, Guangyao Li, and Junjia Cui. “Formation mechanism of transition zone and amorphous structure in magnetic pulse welded Al-Fe joint.” *Materials Letters* 245 (2019): 151–154. DOI: 10.1016/j.matlet.2019.02.118.

7. Wei, Mingzhen, K. Sun, X. Zhang, C. Zhang, Z. Chen, J. Zhou, and F. Xue. “Microstructure and bonding strength of tin-based Babbitt alloy on ASTM 1045 steel by MIG arc brazing.” *Journal of Adhesion Science and Technology* 32.19 (2018): 2150–2161. DOI: 10.1080/01694243.2018.1464239.

8. Kuznetsov, Ruslan V., and Evgeniy O. Olhovich. “Studying the physical processes of forming the adhesive strength of bimetallic bearing for marine engineering.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 11.5 (2019): 902–909. DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-5-902-909.

9. Grashchenkov, D.V., I.Yu. Efimochkin, and A.N. Bolshakova. “High-temperature metal-matrix composite materials reinforced with particles and fibers of refractory compounds.” *Aviation Materials and Technologies* 5 (2017): 318–328. DOI: 10.18577/2071-9240-2017-0-S-318-328.

10. Borisov, G. P., and A. I. Semenchenko. “The role of pressure in the processes of formation of high quality castings from aluminium alloys.” *Foundry. Technologies and Equipment* 5 (2009): 25–33.

11. Sosenushkin, E. N., E. A. Yanovskaya, K.N. Ivanov, and T.A. Kinzhaev. “Liquid forging regimes for AK7 aluminium alloy.” *Tsvetnye Metally* 11 (2018): 83–88. DOI: 10.17580/tsm.2018.11.12.

12. Wang, Hao, G. Qin, P. Geng, and X. Ma. "Interfacial microstructures and mechanical properties of friction welded Al/steel dissimilar joints." *Journal of Manufacturing Processes* 49 (2020): 18–25. DOI: 10.1016/j.jmapro.2019.11.009.
13. Cui, Li, F. Pan, D. He, and L. Chen. "Joining 6 mm thick dissimilar steel/Al alloy butt joints using two keyhole laser-MIG hybrid welding processes." *Journal of Laser Applications* 30.3 (2018): 032418. DOI: 10.2351/1.5040649.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Кузнецов Руслан Валерьевич —

главный металлург

ПАО «Звезда»

192012, Российская Федерация, Санкт-Петербург,
ул. Бабушкина, 123

e-mail: Spaun1605@rambler.ru

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 AUTHORS

Kuznetsov, Ruslan V. —

Chief Metallurgist

PJSC, Zvezda

123 Babushkina Str., St. Petersburg, 192012,
Russian Federation

e-mail: Spaun1605@rambler.ru

Olhovik, 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 6 декабря 2019 г.

Received: December 6, 2019.

СУДОВЫЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ УСТАНОВКИ, СИСТЕМЫ И УСТРОЙСТВА

DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-6-1115-1122

THE INFLUENCE OF SERIAL SHIPBUILDING ON THE COMPLEXITY OF THE POWER EQUIPMENT INSTALLATION

N. I. Gerasimov¹, I. V. Grachev¹, V. A. Zhukov²

¹ — Shipbuilding & Shiprepair Technology Center, JSC,
St. Petersburg, Russian Federation

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

The implementation of the Transport strategy of the Russian Federation until 2030 and Federal target programs for the development of sea and river transport provide the construction of modern vessels for various purposes at domestic shipbuilding enterprises. For the effective tasks solution it is necessary to use progressive methods and means of creation of design and technological documentation and preparation of production. One of the most important and time-consuming stages of construction of marine equipment is the assembly and installation of power equipment. The main marine engines have the largest weight and dimensions and their installation is the most time-consuming. The complexity of mechanical assembly work is reduced to the serial shipbuilding and quality documentation for individual assembly and assembly units. The purpose of the research is to assess the impact of serial shipbuilding on the complexity of installation of power equipment on the basis of statistical data collected during the construction at the Vyborg Shipyard a series of dry cargo ships of 1586 and 1590p project, where diesels 5DKRN 62/140-3 are installed as the main engines. Systematization, processing and analysis of the complexity of equipment installation on the various ships of the series allow us to obtain the analytical dependencies for calculating the complexity and duration of power equipment installation. It is established that in the serial shipbuilding, the complexity of installation and the required number of employees can be reduced by 50 %. Additional reduction of labor intensity can be provided through the use of modern software products at the development of technological documentation. The obtained results can be extended to the implementation of installation of ship power equipment in the construction of ships with the main engines, similar in weight and size to diesel engines 5DKRN 62/140-3.

Keywords: shipbuilding, serial production, main and auxiliary power equipment, two-stroke diesels, mass-dimensional indicators, labor intensity, modular-aggregate method, assembly and mounting units.

For citation:

Gerasimov, Nikolai I., Ivan V. Grachev, and Vladimir A. Zhukov. "The influence of serial shipbuilding on the complexity of the power equipment installation." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 11.6 (2019): 1115–1122. DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-6-1115-1122.

УДК 629.5.03

ВЛИЯНИЕ СЕРИЙНОСТИ ПОСТРОЙКИ СУДОВ НА ТРУДОЕМКОСТЬ МОНТАЖА ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ

Н. И. Герасимов¹, И. В. Грачев¹, В. А. Жуков²

¹ — АО «Центр технологии судостроения и судоремонта»,
Санкт-Петербург, Российская Федерация

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

Отмечается, что реализация «Транспортной стратегии Российской Федерации на период до 2030 года» и федеральных целевых программ развития морского и речного транспорта предусматривают

строительство современных судов различного назначения на отечественных судостроительных предприятиях. Для эффективного решения поставленных задач необходимо использовать прогрессивные методы и средства создания конструкторско-технологической документации и подготовки производства. Одним из наиболее ответственных и трудоемких этапов строительства объектов морской техники является сборка и монтаж энергетического оборудования. Наибольшие массу и габариты имеют главные судовые двигатели и именно их монтаж является особенно трудоемким. Трудоемкость механомонтажных работ снижается при серийном строительстве судов и качественной проработке документации на отдельные сборочно-монтажные единицы. Целью проведенных исследований являлась оценка влияния серийности постройки судов на трудоемкость монтажа энергетического оборудования на основе статистических данных, полученных при строительстве на Выборгском судостроительном заводе серии сухогрузов пр. 1586 и пакетовозов пр. 1590П, на которых в качестве главных двигателей установлены дизели 5ДКРН 62/140-3. Систематизация, обработка и анализ трудоемкостей монтажа оборудования на различных судах серии позволили получить аналитические зависимости для расчета трудоемкости и длительности монтажа энергетического оборудования. Установлено, что при серийном строительстве судов трудоемкость монтажа и численность требуемого количества работников может быть уменьшена на 50 %. Дополнительное снижение трудоемкости может быть обеспечено за счет использования современных программных продуктов при разработке технологической документации. Полученные результаты могут быть использованы в процессе выполнения монтажа судового энергетического оборудования при строительстве судов с главными двигателями, близкими по массогабаритным показателям дизелям 5ДКРН 62/140-3.

Ключевые слова: строительство судов, серийность производства, главное и вспомогательное энергетическое оборудование, двухтактные дизели, массово-габаритные показатели, трудоемкость, модульно-агрегатный метод, сборочно-монтажные единицы

Для цитирования:

Герасимов Н. И. Влияние серийности постройки судов на трудоемкость монтажа энергетического оборудования / Н. И. Герасимов, И. В. Грачев, В. А. Жуков // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2019. — Т. 11. — № 6. — С. 1115–1122. DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-6-1115-1122.

Введение (Introduction)

В «Транспортной стратегии Российской Федерации на период до 2030 года» (далее — Транспортная стратегия), утвержденной распоряжением Правительства РФ №1734-р от 22 ноября 2008 г., указано, что при переходе к инновационному варианту развития транспортной системы необходимо обеспечить кратное повышение производительности труда и энергоэффективности на транспорте, а также достижение передового уровня техники и технологий. Поставленные задачи должны решаться в процессе модернизации гражданского флота Российской Федерации. В соответствии с Транспортной стратегией прогнозируется поставка 397 морских судов суммарным дедвейтом 19,5 млн т. К 2030 г. суммарный тоннаж транспортного флота, контролируемого Россией, составит 38,9 млн т, из которых 70 % будет зарегистрировано под российским флагом. Для повышения конкурентоспособности и провозной способности морского транспортного флота предусматривается его пополнение новыми современными конкурентоспособными судами различного назначения: газовозами, танкерами, танкерами-продуктовозами, балкерами, лесовозами, контейнеровозами, судами типа «ро-ро», а также универсальными судами. Для внутренних водных путей в 2016–2030 гг. предусматривается закупка 3900 единиц судов для обновления грузового флота, 285 единиц пассажирских судов и 1076 судов вспомогательного флота [1]. Постройка судов на отечественных судостроительных заводах должна осуществляться с использованием современных технологий, обеспечивающих сокращение сроков строительства и снижение его трудоемкости при выполнении требований, предъявляемых к качеству изделий.

Монтаж судового энергетического оборудования, включающего главные и вспомогательные элементы судовой энергетической установки, относится к важнейшим этапам судостроительного производства и составляет 6–10 % общей трудоемкости постройки судов [2]. Типовой технологический процесс монтажа энергетического оборудования включает подготовку монтажных баз, погрузку и перемещение оборудования на судне, базирование оборудования, установку компен-

сирующих звеньев между опорными поверхностями оборудования и фундаментом, крепление оборудования, а также контроль качества монтажа. Трудоемкость монтажа отдельных элементов оборудования зависит главным образом от их габаритов и массы. Наиболее габаритным элементом судового энергетического оборудования является главный двигатель, в связи с этим монтажу этого вида оборудования уделяется особое внимание и посвящены проведенные исследования. Вопросы обеспечения требований точности монтажа энергетического оборудования подробно рассмотрены в работе [3].

Известно, что чем значительнее серия строительства судов, тем в большей степени снижаются трудозатраты и продолжительность постройки каждого последующего заказа. Это объясняется тем, что снижаются затраты на конструкторско-технологическую подготовку производства, изготовление средств технологического оснащения, подготовку производственного персонала, который становится более квалифицированным, т. е. способным решать и выполнять производственные задачи на более качественном уровне и с более высокими показателями по производительности труда. Кроме того, отлаживается логистика всего производственного комплекса и кооперация поставок судового оборудования и материалов, сокращается количество отходов материалов и брака во всей сфере производственных процессов и т. д. Поэтому многие иностранные верфи при проектировании новых, близких по конструктивным признакам судов, стараются принимать в своих проектах типовые решения, например, одинаковые машинно-котельные отделения, надстройки, носовые и кормовые блоки судов, движительные комплексы и т. п. [4]–[7].

Методы и материалы (Methods and Materials)

Исходной информацией для проведения исследований являлись статистические данные, полученные при постройке на Выборгском судостроительном заводе серии сухогрузов проекта 1586 и пакетовозов проекта 1590П. На судах указанных проектов в качестве главных двигателей устанавливались пятицилиндровые двухтактные дизели с крейцкопфным кривошипно-шатунным механизмом 5ДКРН 62/140-3 производства Брянского машиностроительного завода. Основные технические характеристики двигателей 5ДКРН 62/140-3 приведены в табл. 1 [8]. Двигатели выпускались по лицензии фирмы «Бурмайстер и Вайн» (ныне MAN Diesel & Turbo), однако их выпуск был прекращен.

Таблица 1

Технические характеристики двигателя 5ДКРН 62/140-3

Эффективная мощность, кВт	Частота вращения коленчатого вала, мин ⁻¹	Среднее эффективное давление, МПа	Цилиндровая мощность, кВт	Средняя скорость поршня, м/с	Габариты			Масса, т
					Длина, м	Ширина, м	Высота, м	
4490	140	0,96	898	6,24	9,40	3,57	9,77	225

В настоящее время в Российской Федерации не производятся судовые малооборотные дизели [9]. На строящихся морских судах устанавливаются малооборотные дизели зарубежного производства. Современные двухтактные двигатели превосходят дизели 5ДКРН 62/140-3 по степени форсированности (среднему эффективному давлению, частоте вращения коленчатого вала, средней скорости поршня). В то же время массогабаритные характеристики дизеля 5ДКРН 62/140-3 сопоставимы с аналогичными характеристиками таких двигателей, как S60MC, L60MC, L50MC, S46MC-C, S42MC, L42MC (MAN Diesel & Turbo), RTA62U, RTA58T, RTA52U, RTA48T (Wärtsilä), UEC60L, UEC50LSII, UEC52LSE, UEC60LS, UEC52LS, UEC60LA (Mitsubishi) [10], [11]. Поэтому полученные результаты могут быть корректно распространены на суда, оснащенные данными двигателями.

В течение периода строительства судов на Выборгском судостроительном заводе были получены данные о трудоемкости сборки и монтажа главных судовых двигателей, которые позволили установить снижение трудоемкости в каждом последующем заказе. Указанные ранее данные

были систематизированы и приведены в табличной форме (табл. 2). На основании данных о трудоемкости сборки и монтажа главных дизельных установок (ДУ), в зависимости от серии их изготовления, были выполнены расчеты относительных трудоемкостей δT_i , %, каждой последующей сборки и монтажа относительно трудоемкости, затраченной на первый дизель T_1 , чел.-ч:

$$\delta T_i = \frac{T_i}{T_1} \cdot 100. \quad (1)$$

Таблица 2

Трудоемкость сборки и монтажа главных ДУ на судах пр. 1586 и 1590П

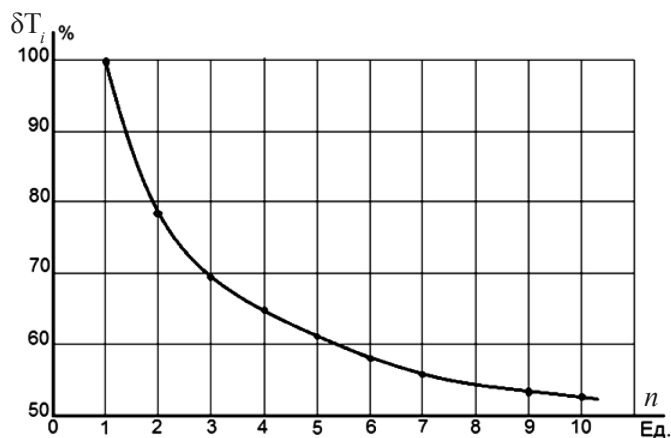
Номер сборки	Трудоемкость сборки и монтажа T_i , чел.-ч	Относительная трудоемкость, δT_i , %	Примечание
1	9647	100,0	Базовая сборка
2	7544	78,2	—
3	6685	69,3	—
4	6193	64,2	—
5	5856	60,7	—
6	5605	58,1	—
7	5402	56,0	—
8	5248	54,4	—
9	5123	53,1	—
10	5007	51,9	—

Данные табл. 2 показывают, что трудоемкость десятой сборки и монтажа ДУ почти в два раза ниже по сравнению с трудоемкостью сборки и монтажа первой ДУ.

Снижение трудоемкости произошло за счет следующих факторов:

- повышение уровня механизации трудоемких ручных работ и, соответственно, повышения производительности труда;
- реализация прогрессивных методов монтажа механического оборудования, новых средств оснащения и приспособлений, улучшающих условия труда,
- увеличение объема агрегатирования механического оборудования [3].

На основе данных табл. 2 построена графическая зависимость относительной трудоемкости от серии сборки и монтажа дизельной установки 5ДКРН 62/140-3 при серийной постройке судов пр. 1586 и 1590П, приведенная на рисунке:



Зависимость изменения относительной трудоемкости сборки и монтажа дизельной установки 5ДКРН 62/140-3

Следует отметить, что аналогичная закономерность снижения трудоемкости сборочно-монтажных работ также прослеживается при сборке и монтаже сборочно-монтажных единиц (СМЕ)

ЯЭУ, ПТУ, ГТЗА и общесудового оборудования, трубопроводов гидравлических, вентиляционных систем и арматуры, электрических систем снабжения, контроля и управления [12], [13].

Для определения математической зависимости влияния серии постройки судов пр. 1586 и 1590П на трудоемкость сборки и монтажа дизельной установки 5ДКРН 62/140-3 выполнена аппроксимация графической зависимости, представленной на рисунке, которая с достаточно высокой сходимостью может быть выражена в виде следующей математической формулы:

$$\delta T_i = 124,25 \frac{1}{\ln \sqrt{12n_i}}, \quad (2)$$

где δT_i — относительная трудоемкость сборки и монтажа i -й дизельной установки, %;
 n_i — i -я сборка и монтаж дизельной установки, ед.

На ранней стадии проектирования судна представляется возможным определить общую трудоемкость сборки и монтажа судового основного и вспомогательного оборудования на предполагаемую серию постройки. При этом если серия небольшая (не более десяти единиц), расчет осуществляется по формуле суммирования:

$$T_{\text{общ}}^{\text{сеп}} = \sum_{i=1}^n T_i^{\text{сеп}} = \sum_{i=1}^n 1,24 \frac{T_1^{\text{сеп}}}{\ln \sqrt{12n_i}}, \quad (3)$$

где $T_{\text{общ}}^{\text{сеп}}$ — общая трудоемкость сборки и монтажа судового основного и вспомогательного оборудования на предполагаемую построечную серию судов, чел.-ч;

$T_i^{\text{сеп}}$ — трудоемкость сборки и монтажа судового основного и вспомогательного оборудования при постройке i -го судна, чел.-ч;

$T_1^{\text{сеп}}$ — трудоемкость сборки и монтажа судового основного и вспомогательного оборудования при постройке головного судна серии, чел.-ч.

При постройке более десяти судов для определения снижения трудоемкости сборки и монтажа основного и вспомогательного оборудования, трубопроводов и арматуры следует использовать расчетную формулу вида

$$T_{\text{общ}}^{\text{сеп}} = \int_{n=1}^n T_i^{\text{сеп}} dn = 1,24 \int_{n=1}^n \frac{T_1^{\text{сеп}}}{\ln \sqrt{12n_i}} dn. \quad (4)$$

Зная величину сокращения трудоемкости от значения серийности постройки проектируемого судна, представляется возможным определить сокращение рабочего персонала и цикла механомонтажных работ, обеспечиваемое за счет агрегатирования механического оборудования при постройке серийных судов.

Количество рабочих P , чел., необходимых для выполнения всего объема работ, связанных с монтажом энергетического оборудования при строительстве серии судов, определяется выражением

$$P = \frac{T_{\text{сеп}}^{\text{общ}}}{8K_n t_1}, \quad (5)$$

где K_n — коэффициент переработки норм, от 1,15 до 1,3;

t_1 — цикл монтажных работ без применения агрегатирования, дней.

Цикл работ, связанных с монтажом судового энергетического оборудования с применением его агрегатирования t_2 , дн., определяется по формуле

$$t_2 = \frac{T_{\text{сеп}}^{\text{общ}} - \sum T_a}{8K_n P}, \quad (6)$$

где $\sum T_a$ — объем работ, выполняемых в цеховых условиях, чел.-ч.

Сокращение цикла механомонтажных работ определяется разностью:

$$\Delta t = t_1 - t_2. \quad (7)$$

Результаты (Results)

Расчеты трудоемкости работ, связанных со сборкой и монтажом двигателя 5ДКРН 62/140-3, выполненные по приведенным формулам (1)–(3), (5) показали, что при постройке десяти судов пр. 1586 и 1590П при принятой годовой производственной программе предприятия, равной пяти судам, сокращение трудоемкости сборки и монтажа десяти дизелей составит 34160 чел.-ч. При этом в первый год трудозатраты составят $T_1 = 35925$ чел.-ч, во второй — $T_2 = 26385$ чел.-ч. Зная трудоемкости сборки и монтажа первого и второго годов, можно осуществить расчет необходимого количества рабочих для каждого года постройки судов. Так, в первый год постройки необходимое количество рабочих для сборки и монтажа пяти дизелей составит 15 человек. Необходимое количество рабочих для выполнения сборочно-монтажных работ при постройке также пяти судов во второй год постройки составляет 11 человек. Без учета серийности трудоемкость общая трудоемкость составляет 94670 чел.-ч, а трудозатраты в каждом году, соответственно, будут равны 47335 чел.-ч, что потребовало бы использования постоянно двадцати рабочих для выполнения механомонтажных работ.

Обсуждение (Discussion)

Учитывая, что в настоящее время в процессе проектирования судов широко применяются компьютерные технологии, позволяющие осуществлять моделирование и макетирование судовой обстановки в машинно-котельном отделении и отдельных сборочно-монтажных единиц, становится возможным улучшение условий монтажа и эргономики для обслуживания оборудования в процессе эксплуатации, а также демонтажа в случае ремонта или модернизации. Усложнение проекта судна, из-за разработки проектно-конструкторской документации на отдельные сборочно-монтажные единицы, становится менее значительным и трудоемким в случае серийной постройки судов.

При разработке сборочно-монтажных единиц машинно-котельного помещения одного из новых проектов морской техники [14] использовались специализированные программные модули в составе системы DELMIA: Human Builder, Human Measurements Editor, Human Posture Analysis, Human Activity Analysis, Human Task Simulation, которые позволили в течение коротких сроков определить и разработать основные группы сборочно-монтажных единиц с макетированием наиболее сложных мест для выполнения монтажных операций с учетом антропологических данных рабочего, выполнить анализ комфортности и нагрузок на персонал при выполнении технологических операций.

Выводы (Summary)

1. Результаты выполненных исследований показали, что производство серийной постройки судов приводит к значительному снижению трудоемкости механомонтажных работ, так как при этом создаются условия для повышения производительности труда и качества выполнения работ.

2. Проектным организациям необходимо предусматривать типовые конструктивные решения при разработке машинно-котельных помещений, надстроек, носовых и кормовых блоков судов, использовать по возможности типовые системы обслуживания главных двигателей, общесудового оборудования и т. д.

3. Проектанту при разработке нового проекта судна, постройка которого должна быть серийной, представляется возможным определить общую стоимость постройки серии судов, а предприятию-строителю — необходимое количество рабочего персонала по организации сборки и монтажа всего судового оборудования.

4. Современные специализированные пакеты позволяют существенно сократить сроки разработки проектно-конструкторской и технологической документации и повысить ее качество, что также способствует сокращению трудоемкости механомонтажных работ при строительстве судов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Транспортная стратегия Российской Федерации на период до 2030 года. Утв. распоряжением Правительства РФ №1734-р от 22 ноября 2008 года [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <http://government.ru/docs/22047/> (дата обращения: 01.11.2019).
2. Александров В. Л. Технология судостроения / В. Л. Александров [и др.]. — СПб.: Профессия, 2003. — 342 с.
3. Герасимов Н. И. Технология монтажа судового энергетического оборудования / Н. И. Герасимов. — СПб.: ОАО «ЦТСС», 2014. — 622 с.
4. Шенинг З. Р. Модульно-агрегатный метод монтажа судового оборудования / З. Р. Шенинг. — Л.: Судостроение, 1991. — 232 с.
5. Мореходов М. А. Современная сборка судов – новые технологии / М. А. Мореходов // Судостроение. — 2009. — № 2 (783). — С. 64–67.
6. Голланд В. А. Развитие модульных принципов в подводном кораблестроении / В. А. Голланд, А. А. Васильев // Судостроение. — 2012. — № 6 (805). — С. 24–30.
7. Герасимов Н. И. Оценка влияния объема агрегатирования основного и вспомогательного оборудования на продолжительность монтажа на объектах морской техники / Н. И. Герасимов, А. О. Михайлов, И. В. Грачев // Судостроение. — 2015. — № 3 (820). — С. 49–52.
8. Дизели: справ. / под общ. ред. В. А. Ваншейдта, Н. И. Иванченко, Л. К. Коллерова. — Л.: Машиностроение, 1977. — 480 с.
9. 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.
10. Конкс Г. А. Мировое судовое дизелестроение. Концепция конструирования, анализ международного опыта / Г. А. Конкс, В. А. Лашко. — М.: Машиностроение, 2005. — 512 с.
11. 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.
12. Лямин П. Л. Разработка инновационных технологий сборки и монтажа судовых механизмов, корабельных комплексов и систем в рамках реализации Федеральных целевых программ / П. Л. Лямин, Д. Н. Канаев, А. О. Михайлов, М. В. Битный-Шляхто // Судостроение. — 2013. — № 4 (809). — С. 82–86.
13. Герасимов Н. И. Основные направления развития модульно-агрегатного метода монтажа судовых ЯЭУ/ Н. И. Герасимов, Д. Н. Канаев, И. В. Грачев // Судостроение. — 2018. — № 5. — С. 35–40.
14. Герасимов Н. И. Расчет технико-экономических показателей внедрения модульно-агрегатного метода монтажа судового оборудования при постройке объектов морской техники / Н. И. Герасимов, А. О. Михайлов, И. В. Грачев. — СПб.: АО «ЦТСС», 2017. — 92 с.

REFERENCES

1. Transportnaya strategiya Rossiiskoi Federatsii na period do 2030 goda. Utverzhdena rasporyazheniem pravitel'stva RF №1734-r ot 22 noyabrya 2008 goda. Web. 1 Nov. 2019 <<http://government.ru/docs/22047/>>.
2. Aleksandrov, V. L., A. R. Ar'yu, E. V. Ganov, A. V. Dogadin, V. Yu. Leizerman, A. S. Roganov, I. A. Sokolova, and P. I. Shcherbinin. *Tekhnologiya sudostroeniya*. SPb.: Professiya, 2003.
3. Gerasimov, N. I. *Tekhnologiya montazha sudovogo energeticheskogo oborudovaniya*. SPb.: ОАО «TsTSS», 2014.
4. Shening, Z. R. *Modul'no-agregatnyi metod montazha sudovogo oborudovaniya*. L.: Sudostroenie, 1991.
5. Morekhodov, M. A. "Sovremennaya sborka sudov – novye tekhnologii." *Sudostroenie* 2 (2009): 64–67.
6. Golland, V. A., and A. A. Vasilyev. "The development of modular principles in submarine construction." *Sudostroenie* 6(805) (2012): 24–30.
7. Gerasimov, N. I., A. O. Mikhailov, and I. V. Grachev. "Estimating influence of building-block approach to main and auxiliary equipment on duration of marine equipment assembly." *Sudostroenie* 3(820) (2015): 49–52.
8. Vansheidt, V. A., N. I. Ivanchenko, and L. K. Kollerov, eds. *Dizeli. Spravochnik*. L.: Mashinostroenie, 1977.
9. 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.

10. Konks, G. A., and V. A. Lashko. *Mirovye sudovoe dizelestroenie. Kontsepsiya konstruirovaniya, analiz mezhdunarodnogo opyta*. M.: Mashinostroenie, 2005.
11. 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.
12. Lyamin, P. L., D. N. Kanaev, A. O. Mikhailov, and M. V. Bitny-Shlyakhto. "Developing advanced technologies and ship systems as part of implementation of Federal Target Programs." *Sudostroenie* 4(809) (2013): 82–86.
13. Gerasimov, N. I., D. N. Kanaev, and I. V. Grachev. "Modular installation method of shipboard NPPs: main development prospects." *Sudostroenie* 5 (2018): 35–40.
14. Gerasimov, N. I., A. O. Mikhailov, and I.V. Grachev. *Raschet tekhniko-ekonomicheskikh pokazatelei vnedreniya modul'no-agregatnogo metoda montazha sudovogo oborudovaniya pri postroyke ob'ektov morskoi tekhniki*. SPb.: AO «TsTSS», 2017.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ	INFORMATION ABOUT THE AUTHORS
Герасимов Николай Иванович — доктор технических наук, старший научный сотрудник АО «Центр технологии судостроения и судоремонта» 198095, Российская Федерация, Санкт-Петербург, ул. Промышленная, 7 e-mail: inbox@sstc.spb.ru Грачев Иван Владимирович — начальник бюро АО «Центр технологии судостроения и судоремонта» 198095, Российская Федерация, Санкт-Петербург, ул. Промышленная, 7 e-mail: inbox@sstc.spb.ru Жуков Владимир Анатольевич — доктор технических наук, доцент ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова» 198035, Российская Федерация, Санкт-Петербург, ул. Двинская, 5/7, e-mail: kaf_sdvs@gumrf.ru	Gerasimov, Nikolai I. — Dr. of Technical Sciences, Senior Researcher Shipbuilding & Shiprepair Technology Center, JSC 7 Promyshlennaya Str., St Petersburg, 198099, Russian Federation e-mail: inbox@sstc.spb.ru Grachev, Ivan V. — Head of bureau Shipbuilding & Shiprepair Technology Center, JSC 7 Promyshlennaya Str., St Petersburg, 198099, Russian Federation e-mail: inbox@sstc.spb.ru 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: kaf_sdvs@gumrf.ru

Статья поступила в редакцию 24 ноября 2019 г.
Received: November 24, 2019.

DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-6-1123-1132

PROBLEM OF SHIP POWER EQUIPMENT DIAGNOSTIC

A. A. Zhelezniak, V. V. Yenivatov, V. A. Dorovskoy

Kerch State Marine Technological University, Kerch, Russian Federation

One of the most difficult tasks solved when ensuring the quality of diagnostics in the space of objects of ship power equipment is the task of constructing an algorithm for generating reference data for diagnostics of ship power equipment. To calculate data of shipboard power equipment, required for identification of the elements images, regarding knowledge about them - references, it is required to define the rules for measuring elements, diagnostic data and the distances between elements of diagnostic data in the images space. The creation of an information system that implements the technology of information analysis and identification of various types of data of ship power equipment requires the development of criteria for assessing the amount of information and proximity of images in the task of identifying objects in the required range. The research aim is to develop an entropy model of the process of diagnostics of ship power equipment, which allows us to identify the objects of ship power equipment in the required range, able to withstand interference and disturbances at the robotic systems management. In developing the entropy model of the process of formalizing identification procedures, the theory of pattern recognition in the problem of constructing a hypothesis, the theory of invariance in solving the problem of improving noise immunity, and also the algebra of logic in the problem of decision making are used. An important principle of constructing an entropy model of the process is the adaptability of knowledge representation and solution search. The requirements of adaptability to various changes are as follows: the developed entropic model of the process of identification of diagnostic data of ship power equipment at each time point should support the organization of processes. In the diagnosis of complex equipment, the system should be able to find an acceptable solution under severe time constraints. The number of analyzed parameters can be very large, which does not allow us to conduct a qualitative analysis of information on the basis of its sequential processing. The entropy model of the process of identification of diagnostic data of ship power equipment allow us to conclude that the images space of diagnostic data, the signal space and the information space describing the entropy model of the system are normalized metric spaces.

Keywords: ship power plant, main engine, auxiliary engine, identification, expert system, electric power equipment.

For citation:

Zheleznyak, Aleksandr A., Valerii V. Yenivatov, and Vladimir A. Dorovskoy. "Problem of ship power equipment diagnostic." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 11.6 (2019): 1123–1132. DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-6-1123-1132.

УДК 621.43

ПРОБЛЕМА ДИАГНОСТИКИ СУДОВОГО ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ

А. А. Железняк, В. В. Ениватов, В. А. Доровской

ФГБОУ ВО «Керченский государственный морской технологический университет»,
Керчь, Российская Федерация

Отмечается, что одним из наиболее сложных задач, решаемых при обеспечении качества диагностики в пространстве объектов судового энергетического оборудования (СЭО), является построение алгоритма генерации эталонных данных диагностики судового энергетического оборудования. Для вычисления необходимых для идентификации образов элементов данных судового энергетического оборудования (СЭО) относительно знаний о них — эталонов, требуется определить правила измерения элементов, данных диагностики и расстояний между элементами данных диагностики в пространстве образов. Создание информационной системы, реализующей технологию анализа информации и идентификации различных видов данных судового энергетического оборудования, требует разработки критериев оценивания количества информации и близости образов в задаче идентификации объектов в требуемом диапазоне. Целью

исследования является разработка энтропийной модели процесса диагностики судового энергетического оборудования, позволяющей выполнять идентификацию объектов судового энергетического оборудования в требуемом диапазоне, способной противостоять воздействию помех и возмущений при управлении роботизированными комплексами. При разработке энтропийной модели процесса формализации процедур идентификации использованы теория распознавания образов в задаче построения гипотезы, теория инвариантности при решении задачи повышения помехоустойчивости, а также алгебра логики в задаче принятия решений. Важным принципом построения энтропийной модели процесса является адаптивность представления знаний и поиска решения. Требования адаптивности к различным изменениям сводятся к следующему: разработанная энтропийная модель процесса идентификации данных диагностики судового энергетического оборудования в каждый момент времени должна поддерживать организацию процессов. При диагностике сложного оборудования система должна обеспечивать возможность поиска приемлемого решения в условиях жестких временных ограничений. Число анализируемых параметров может быть очень большим, что не позволяет выполнить качественный анализ информации на основе последовательной ее обработки. Энтропийная модель процесса идентификации данных диагностики судового энергетического оборудования позволяет сделать следующие выводы: пространство образов данных диагностики, пространство сигналов и информационное пространство, описывающее энтропийную модель процесса диагностики системы, являются нормированными метрическими пространствами.

Ключевые слова: судовая энергетическая установка, главный двигатель, вспомогательный двигатель, идентификация, экспертная система, электроэнергетическое оборудование.

Для цитирования:

Железняк А. А. Проблема диагностики судового энергетического оборудования / А. А. Железняк, В. В. Ениватов, В. А. Доровской // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2019. — Т. 11. — № 6. — С. 1123–1132. DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-6-1123-1132.

Введение (Introduction)

Одной из наиболее сложных задач, решаемых при обеспечении устойчивости в пространстве объектов главной и вспомогательной судовой энергетической установки (СЭУ), является задача построения алгоритма генерации эталонных изображений, представленных главной энергетической установкой (ГЭУ). В случае, если класс систем ГЭУ характеризуется перечнем входящих в него объектов главной и вспомогательной СЭУ, то построение алгоритма распознавания метода компенсации информационных потоков генерации эталонных изображений может быть основано на принципе принадлежности к этому перечню. Этот метод называется *методом сравнения с эталоном*, согласно которому множество образов, принадлежащих одному классу, запоминается системой идентификации. При предъявлении системе новых образов она последовательно сравнивает их с эталонными образами, хранящимися в памяти. Система относит новый образ к тому классу, к которому принадлежал эталонный образ, совпавший с предъявленным. Этот метод «работает» хорошо только когда выборка близка к идеальной или идеальны условия предъявления изображений.

В том случае, когда для членов одного класса объектов главной или вспомогательной СЭУ характерны некоторые общие признаки, система распознавания строится на принципе общности свойств, которые хранятся в памяти системы. В процессе обработки изображений система должна быть способна выделять признаки из предъявленного изображения и работать с ними. Она зачисляет вновь предъявленное изображение в класс, признаки которого подобны признакам, выделенным у нового изображения.

Анализ научных публикаций по теме исследования

Для вычисления необходимых для идентификации образов элементов СЭУ, относительно знаний о них — эталонов, требуется определить правила измерения элементов и расстояний между элементами в пространстве образов [1]–[4]. В проведенных авторами анализа данных диагностики СЭО множество образов элементов данных диагностики представлено как Ω . Если брать в качестве определения образа «оборудование» как физический объект, то элементы множества данных не пересекаются и имеют вид:

$$\omega_i \cap \omega_j = \emptyset; \quad i = \overline{1, n}; \quad j = \overline{1, n}; \quad i \neq j, \quad \bigcup_{i=1}^n \omega_i = \Omega. \quad (1)$$

Данный подход к определению нормы в пространстве образов рассмотрен в работах [5]–[8], где показано, что вероятность в данном случае удовлетворяет требованиям, предъявляемым к норме:

$$P_i = \|\omega_i\|, \quad P_i \neq 0, \quad \omega_i \neq \emptyset;$$

$$\|\lambda \omega_i\| = \lambda \|\omega_i\|, \quad P_\lambda = 1; \quad (2)$$

$$\omega_i \cup \omega_j \leq \|\omega_i\| + \|\omega_j\| \Leftrightarrow P(\omega_i \cup \omega_j) = P(\omega_i) + P(\omega_j) - P(\omega_i \cap \omega_j), \quad P(\omega_i \cap \omega_j) \geq 0.$$

Таким образом, вероятность является нормой для множества образов, определяя правило измерения величины, соотносимой с образом. Данному случаю соответствует простейшая модель идентификации объекта по норме (рис. 1). Однако необходимо определить не только правило измерения элемента, но и правило определения расстояния между элементами — метрики [2], [13]. Поскольку рассматривается система СЭУ, для которой важным является сравнение элементов, необходимо определить правило определения расстояния между событиями ω_i и ω_j . Естественно, что расстояние между образами $\alpha = \alpha(\omega_i, \omega_j)$ определяется как вероятность, так как последняя является нормой.

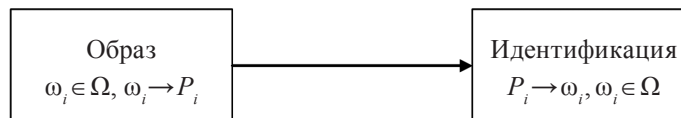


Рис. 1. Системы структурной идентификации по норме

Таким образом, источник генерирует образы с определенными вероятностями, система идентификации выдвигает гипотезы из заданного алфавита эталонов с соответствующими вероятностями. Степень достоверности гипотезы определяется расстоянием между образом, реализованным источником, и порождаемой эталоном гипотезой. Структура системы в этом случае имеет вид процедуры проверки гипотез (рис. 2).

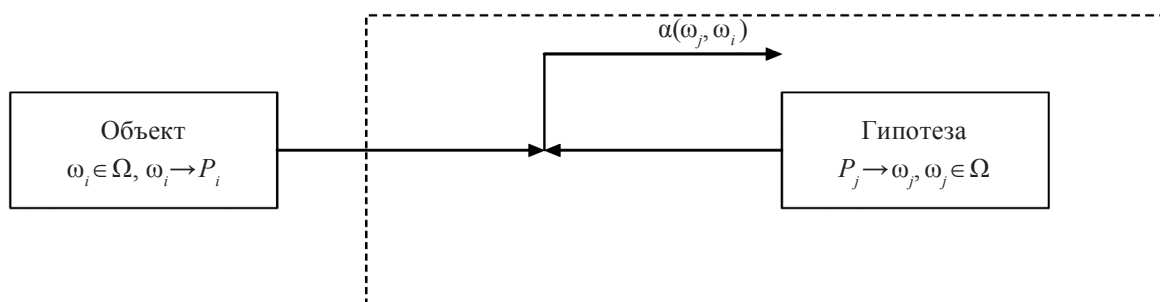


Рис. 2. Структура системы с проверкой гипотезы

Естественно, сохраняя формальное условие формирования метрики как нормы разности, в данном случае нормы разности множеств

$$\alpha(\omega_i, \omega_j) = \|\omega_i / \omega_j\|. \quad (3)$$

Следовательно, расстояние в пространстве образов формируется как вероятность разности множеств вида

$$\alpha(\omega_i, \omega_j) = P(\omega_i / \omega_j). \quad (4)$$

Поскольку справедливо равенство

$$\omega_i / \omega_j = \omega_i \setminus \omega_j, \quad (5)$$

выражение (4) можно записать в виде

$$\alpha(\omega_i, \omega_j) = P(\omega_i / \varpi_j). \quad (6)$$

Событие ω_i всегда рассматривается как входное, поэтому учитывая, что в силу полноты ансамблей справедливо равенство

$$P(\varpi_i / \omega_j) = 1 - P(\omega_i / \omega_j) \quad (7)$$

и исключив дополнение, получаем метрику пространства образов в виде

$$P(\varpi_i / \omega_j) = P(\omega_j)(1 - P(\omega_i / \omega_j)). \quad (8)$$

В данном случае целесообразно нормировать полученное отношение на вероятность входного образа, что позволит оценивать расстояние между образами ω_i и ω_j условной вероятностью

$$\alpha(\omega_i, \omega_j) = \frac{P(\varpi_i / \omega_j)}{P(\omega_i)} = 1 - P(\omega_i / \varpi_j). \quad (9)$$

Постановка проблемы

Создание информационной системы, реализующей технологию анализа информации и идентификации различных видов данных судового энергетического оборудования, требует разработки критериев оценивания количества информации и близости образов в задаче идентификации объектов в требуемом диапазоне.

Целью исследования является разработка энтропийной модели процесса идентификации экспертной системы диагностики судового энергетического оборудования, позволяющей выполнять идентификацию объектов главной и вспомогательной энергетической установки в требуемом диапазоне, способной противостоять воздействию помех и возмущений при управлении роботизированными комплексами.

Материалы и методы исследования (Methods and Materials)

При разработке энтропийной модели процесса формализации процедур идентификации использованы теория распознавания образов в задаче построения гипотезы, теория инвариантности при решении задачи повышения помехоустойчивости, а также алгебра логики в задаче принятия решений.

Результаты (Results)

Информационная мера обладает очевидным преимуществом инвариантности [2], [8]–[10], что особенно важно при неопределенности, создаваемой возмущениями в пространстве объектов СЭУ. Так как для накопления информации используется операция усреднения, применив оператор математического ожидания к информации I_ω , получаем энтропию или ожидаемую информацию источника ω , т. е. $M\{I_\omega\} = H_\omega$. Следовательно, при определении меры близости объекта и модели в задачах идентификации приходим к использованию энтропии как меры близости [11]. Безусловная энтропия выходной величины Y представляется в виде суммы количества информации о Y , содержащейся в X , и средней условной энтропии Y относительно X :

$$H H\{Y\} = I(Y, X) + H(Y|x). \quad (10)$$

Для дискретных переменных:

$$\begin{aligned} H\{Y\} &= -\sum_{i=1}^n p_i \log p_i; \\ I(Y, X) &= -\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \frac{p_{ij}}{p_i r_j} p_{ij}; \\ H(Y|x) &= -\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n p_i \log p(y_i | x_j), \end{aligned} \quad (11)$$

где p_i и r_j — вероятности событий $Y = y_i$, $X = x_j$; вероятность p_{ij} — совместная вероятность $Y = y_i$ и $X = x_j$; вероятность $p(y_i | x_j)$ — условная вероятность событий $Y = y_i$ при $X = x_j$.

Безусловная энтропия выходной переменной представляется двумя составляющими: мерой количества информации о выходной переменной, которая может быть получена по входной переменной, и априорной неопределенностью, связанной с влиянием переменных, отличных от x_i . Тогда

$$\frac{H\{Y\}}{H\{Y\}} = \frac{I(Y, X)}{H\{Y\}} + \frac{H(Y|x)}{H\{Y\}} = 1. \quad (12)$$

Обозначив

$$q(X, Y) = \frac{I(Y, X)}{H\{Y\}};$$

$$\bar{q}(Y, X) = \frac{H(Y|x)}{H\{Y\}}, \quad (13)$$

получим

$$q(X, Y) + \bar{q}(Y, X) = 1. \quad (14)$$

В качестве информационной меры идентичности предлагается использовать величину

$$\bar{q}(Y, X) = \frac{H(Y|x)}{H\{Y\}}. \quad (15)$$

Данная мера обладает следующими свойствами: когда выходная величина Y полностью определяется входной величиной X , информационная мера идентичности обращается в ноль:

$$\sum_{j=1}^n p(y_i / x_j) \log p(y_i / x_j) = 0, \quad (16)$$

так как все вероятности равны нулю, кроме одной, равной единице. Отсюда следует, что

$$H(Y|x) = 0;$$

$$\bar{q}(Y, X) = \frac{H(Y|x)}{H\{Y\}} = 0. \quad (17)$$

С другой стороны, при статистической независимости Y и X :

$$H(Y|x) = H(Y);$$

$$\bar{q}(Y, X) = \frac{H(Y)}{H\{Y\}} = 1. \quad (18)$$

Таким образом, информационная мера идентичности позволяет получить удобную оценку идентичности для моделей.

Для непрерывных случайных величин X , Y :

$$H(Y|x) = - \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} f(x, y) \log \{l_y \varphi(y/x)\} dx dy;$$

$$H(Y) = \int_{-\infty}^{\infty} \varphi(y) \log \{l_y \varphi(y)\} dy; \quad (19)$$

$$I(X, Y) = - \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} f(x, y) \log \frac{\varphi(y/x)}{\varphi(y)} dx dy,$$

где $f(x, y)$ — совместная плотность распределения величин X и Y ; $\varphi(y)$ — плотность распределения Y ; $\varphi(x/y)$ — условная плотность распределения Y относительно X ; l_y — некоторый интервал, определяющий собой положение нуля на шкале энтропии — начало отсчета энтропии случайной величины Y .

Если выбрать этот интервал таким образом, чтобы $H\{Y\}$ и $H\{Y/x\}$ были неотрицательны, то информационная мера идентичности может быть сформирована для объектов с непрерывными случайными входной и выходной величинами:

$$\begin{aligned} g\{X, Y\} &= \frac{I\{X, Y\}}{1 + I\{X, Y\}}; \\ \bar{g}\{X, Y\} &= \frac{1}{1 + I\{X, Y\}}; \\ g\{X, Y\} + \bar{g}\{X, Y\} &= 1. \end{aligned} \quad (20)$$

Естественно, свойства информационной меры идентичности сохраняются. Понятие информационной меры идентичности обобщается в статистических многомерных и динамических объектах. Для входного случайного вектора $X(X_1, X_2, \dots, X_n)$ и выходного вектора $Y(Y_1, Y_2, \dots, Y_n)$ имеем:

$$\begin{aligned} H(Y_j | x_1, \dots, x_n) &= - \int_{-\infty}^{\infty} \dots \int_{-\infty}^{\infty} f(x_1, \dots, x_n, y_j) \log \{l_y \varphi(y_j / x_1, \dots, x_n)\} dx_1 \dots dx_n dy_j; \\ H(Y_j) &= I(X_1, \dots, X_n, Y_j) + H(Y_j | x_1, \dots, x_n); \\ I(X_1, \dots, X_n, Y_j) &= - \int_{-\infty}^{\infty} \dots \int_{-\infty}^{\infty} f(x_1, \dots, x_n, y_j) \log \frac{\varphi(y_j / x_1, \dots, x_n)}{\varphi(y_j)} dx_1, \dots, dx_n dy_j. \end{aligned} \quad (21)$$

При этом $I(X_1, \dots, Y_2, Y_j)$ представляет собой количество информации о входной величине объекта, которое может быть получено по вектору входных величин при рассмотрении их совместного влияния на Y_j , а средняя условная энтропия $H(Y_j / X_1, \dots, X_n)$ является характеристикой той неопределенности, которая вызвана влиянием совокупности других факторов. Тогда аналогично одномерному случаю в качестве информационной меры идентичности принимается нормированное значение $I(X_1, \dots, Y_2, Y_j)$ и в качестве меры неидентичности — нормированное значение $H(Y_j / X_1, \dots, X_n)$.

$$g\{X_1, \dots, X_n, Y_j\} = \frac{I\{X_1, \dots, X_n, Y_j\}}{H\{Y_j\}}; \quad \bar{g}\{X_1, \dots, X_n, Y_j\} = \frac{H\{Y_j / X_1, \dots, X_n\}}{H\{Y_j\}}. \quad (22)$$

Известен подход к формированию словаря признаков, основанный на определении классов $P(\Omega_j)$, $I, j = 1, \dots, m$, с условными плотностями распределений значений признаков $f_j(x_l), f_j(x_s)$. Количество информации, получаемое системой при измерении признака x_l , равно величине полной условной энтропии [12]:

$$\bar{H}(B / x_l) = - \sum_{j=1}^m P(\Omega_j) \sum_{i=1}^m \sum_{k=1}^{n_i} P(x_{l_k} / \Omega_j) P(\Omega_j / x_{l_k}) \log P(\Omega_j / x_{l_k}). \quad (23)$$

Если система получила результаты, связанные с определением с помощью экспериментов полной энтропией системы и полной условной энтропией, то получим

$$J_{x_l} = H(A) - \bar{H}(B / x_l). \quad (24)$$

При этом предполагается, что качество признака x_l тем больше, чем больше количество информации, получаемое системой при определении данного признака. Таким образом, процедура обратной связи должна содержать не менее двух каналов: канал коррекции текущих возмущений и канал нормализации.

Реализация структуры, приведенной на рис. 3, затруднена тем, что непосредственное измерение информационных характеристик затруднено, и более удобно использовать обратную задачу:

$$\begin{aligned} \omega^* &\xrightarrow{u=u^*} \inf I(\omega, \omega^*(u^*)) = 0; \\ u^* &\xrightarrow{\omega=\omega^*} \sup (f - f^*(\omega, \omega(u))) = 0; \\ f - f^*(\omega, \omega(0)) &< 0, \end{aligned} \quad (25)$$

что приводит к решению задачи в пространстве сигналов. Задача идентификации в пространстве сигналов ведет к созданию системы управления — регулятора для ассоциативной памяти, обеспечивающей генерацию эталонных данных [13]. Исходя из требования устранения статической ошибки, структура регулятора должна включать тракты накопления информации, нормализации и прогноза. Данная структура (см. рис. 3) позволяет наиболее полно использовать информацию об объекте при решении задачи идентификации.

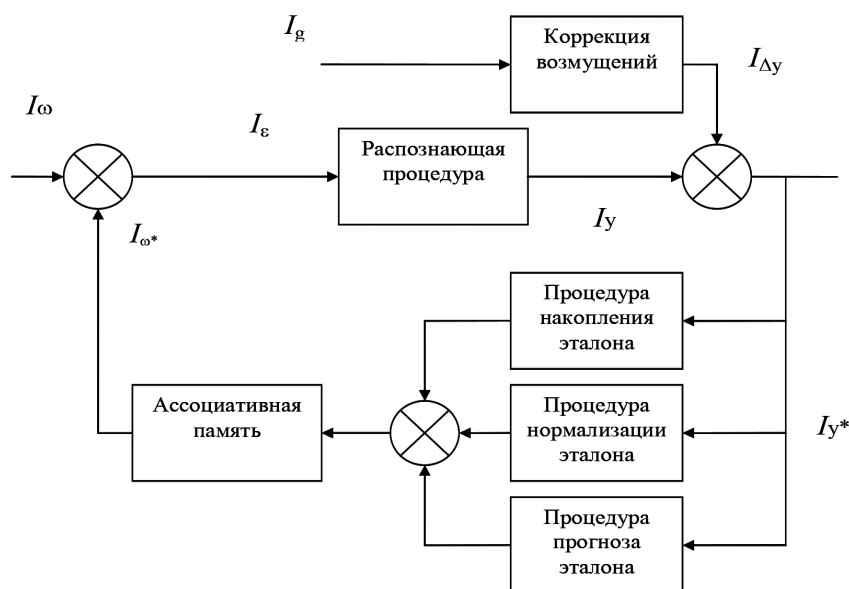


Рис. 3. Энтропийная модель процесса идентификации экспертной системы диагностики судового энергетического оборудования

Полученная энтропийная модель процесса идентификации данных диагностики судового энергетического оборудования отвечает требованию инвариантности, допуская получение независимости от возмущений и оптимальных динамических характеристик.

Обсуждение (Discussion)

Рассмотрим полученную энтропийную модель с точки зрения использования при диагностике судового энергетического оборудования. Энтропийная модель процесса идентификации данных диагностики судового энергетического оборудования является системой интеллекта, включающей ряд взаимодействующих между собой интеллектуальных модулей и определяется следующим набором:

$$SS = \langle M, R(M), F(M), F(SS) \rangle, \quad (26)$$

где $M = \{M_i\}$ — множество формальных или логико-лингвистических моделей, реализующих определенные интеллектуальные функции;

$R(M)$ — функция выбора необходимой модели (совокупности моделей) в текущей ситуации;

$F(M) = \{F(M_i)\}$ — множество функций модификации моделей;

$F(SS)$ — функция модификации собственно системы SS и ее базовых конструкций M , $R(M)$, $F(M)$.

Важным принципом построения энтропийной модели процесса является адаптивность представления знаний и поиска решения. Требования адаптивности к различным изменениям сводятся к следующему: разработанная энтропийная модель процесса идентификации данных диагностики судового энергетического оборудования в каждый момент времени должна поддерживать организацию процессов. При диагностике сложного оборудования система должна обеспечивать возможность поиска приемлемого решения в условиях жестких временных ограничений. Число

анализируемых параметров может быть очень большим, что не позволяет выполнить качественный анализ информации на основе ее последовательной обработки.

На рис. 4 приведены поле корреляции линии равного уровня поля корреляции и накопленного за двадцать строк сканирования сигнала управления при обнаружении дефекта структуры вспомогательного дизель-генераторного агрегата рыбопромыслового судна.

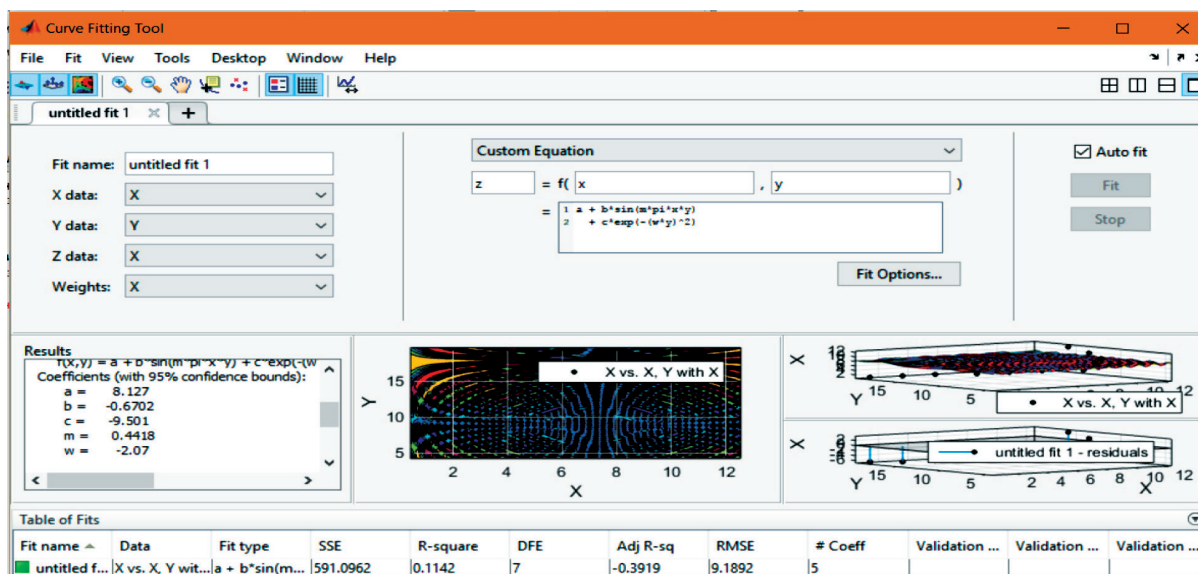


Рис. 4. Поле отклика коррелятора в момент обнаружения дефекта вспомогательного дизель-генератора рыбопромыслового судна (скриншот MatLab)

Как видно из рис. 4, при обнаружении дефектного участка затраты управления резко увеличиваются, что позволяет принять решение об отличии состояния контролируемого полотна от эталонного.

Выводы (Summary)

1. Разработанная энтропийная модель процесса идентификации данных диагностики судового энергетического оборудования позволяет выполнять диагностику объектов главной и вспомогательной энергетической установки в требуемом диапазоне при условии противостояния воздействию внешних возмущений

2. Энтропийная модель процесса идентификации данных диагностики судового энергетического оборудования позволяет сделать следующие выводы: пространство образов данных диагностики, пространство сигналов и информационное пространство, описывающее энтропийную модель системы, являются нормированными метрическими пространствами.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Барсегян А. А. Анализ данных и процессов: учеб. пособие / А. А. Барсегян [и др.]. — 3-е изд. — СПб.: БХВ-Петербург, 2009. — 512 с.
2. Zhukov V. Monitoring Systems of Ship Power Plants During Operation / V. Zhukov, A. Butsanets, S. Sherban, V. Igonin // Energy Management of Municipal Transportation Facilities and Transport. — Springer, Cham, 2018. — Pp. 419–428. DOI: 10.1007/978-3-030-19756-8_40.
3. Жиленков А. А. Исследование автоколебательных процессов в комбинированных автономных электроэнергетических системах / А. А. Жиленков, С. Г. Черный // Контроль. Диагностика. — 2016. — № 5. — С. 61–67. DOI: 10.14489/td.2016.05.pp.061-067.
4. Черный С. Г. Повышение производительности микропроцессорной сети управления на платформе Ethernet для системы буровых комплексов / С. Г. Черный // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. — 2016. — № 1. — С. 2–10.

5. Доровской В. А. Идентификация профессиональных знаний операторов автоматизированных систем управления: дис... д-ра техн. наук: 05.13.06 / Владимир Алексеевич Доровской. — Херсон: ХНТУ, 2004. — 412 с.

6. Железняк А. А. Перспективные пути повышения эффективности диагностирования параметров надежности эксплуатации морского бурового оборудования / А. А. Жиленков, А. А. Железняк, С. Г. Черный // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2015. — № 1 (29). — С. 90–97. DOI: 10.21821/2309-5180-2015-7-1-90-97.

7. Железняк А. А. Мониторинг данных микропроцессорных сетей управления судовыми электро-энергетическими системами / А. А. Железняк, В. А. Доровской // Системы управления и информационные технологии. — 2015. — № 4 (62). — С. 89–94.

8. Васильев Б. В. Диагностирование технического состояния судовых дизелей / Б. В. Васильев, Д. И. Кофман, С. Г. Эренбург; под ред. Б. В. Васильева. — М.: Транспорт, 1982. — 144 с.

9. Zhilenkov A. Investigation performance of marine equipment with specialized information technology / A. Zhilenkov, S. Chernyi // Procedia Engineering. — 2015. — Vol. 100. — Pp. 1247–1252. DOI: 10.1016/j.proeng.2015.01.490.

10. Черный С. Г. Анализ надежности энергетических систем морских буровых платформ в акватории черного моря / С. Г. Черный // Нефтяное хозяйство. — 2016. — № 2. — С. 106–110.

11. Горева Т. И. Нейросетевые модели диагностики технических систем / Т. И. Горева, Н. Н. Портнягин, Г. А. Пюкке // Вестник КРАУНЦ. Физико-математические науки. — 2012. — № 1 (4). — С. 31–43.

12. Сахаров В. В. Алгоритмизация и синтез систем управления судовыми динамическими объектами средствами математического программирования / В. В. Сахаров, А. А. Чертков, С. В. Сабуров // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2016. — № 3 (37). — С. 201–211. DOI: 10.21821/2309-5180-2016-7-3-201-211.

13. Zhukov V. A. Engines for Water Transport of Russia / V. A. Zhukov [et al] // 2018 IEEE «International Conference Quality Management, Transport and Information Security, Information Technologies» (IT&QM&IS). — IEEE, 2018. — Pp. 290–294. DOI: 10.1109/ITMQIS.2018.8525101.

REFERENCES

1. Barsegryan, A. A., M. S. Kupriyanov, I.I. Kholod, M.D. Tess, and S.I. Elizarov. *Analiz dannykh i protsessov: ucheb. posobie*. 3rd ed. SPb.: BKhV-Peterburg, 2009.

2. Zhukov, Vladimir, Artem Butsanets, Sergey Sherban, and Vladimir Igonin. “Monitoring Systems of Ship Power Plants During Operation.” *Energy Management of Municipal Transportation Facilities and Transport*. Springer, Cham, 2018. 419–428. DOI: 10.1007/978-3-030-19756-8_40

3. Zhilenkov, A. A., and S. G. Chernyi. “The Investigation of the self-sustained oscillations in a Combined Autonomous Electric Energy Systems.” *Testing, Diagnostics* 5 (2016): 61–67. DOI: 10.14489/td.2016.05.pp.061-067

4. Chernyi, S. G. “Improving performance of microprocessor network management platform for Ethernet systems drilling rigs.” *Instruments and Systems: Monitoring, Control, and Diagnostics* 1 (2016): 2–10.

5. Dorovskoi, V. A. Identifikatsiya professional'nykh znaniy operatorov avtomatizirovannykh sistem upravleniya. Dr. diss. Kherson: KhNTU, 2004.

6. Zhilenkov, A. A., A. A. Zhelezniak, and S. G. Cherniy. “Prospective ways to improve the efficiency of diagnosis reliability parameters of operation of offshore drilling equipment.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 1(29) (2015): 90–97. DOI: 10.21821/2309-5180-2015-7-1-90-97.

7. Zheleznyak, A. A., and V. A. Dorovskoi. “Monitoring dannykh mikroprotsessornykh setei upravleniya sudovymi elektroenergeticheskimi sistemami.” *Sistemy upravleniya i informatsionnye tekhnologii* 4(62) (2015): 89–94.

8. Vasil'ev, B. V., D. I. Kofman, and S.G. Erenburg. *Diagnostirovanie tekhnicheskogo sostoyaniya sudovykh dizelei*. Edited by B. V. Vasil'ev. M.: Transport, 1982.

9. Zhilenkov, Anton, and Sergei Chernyi. “Investigation performance of marine equipment with specialized information technology.” *Procedia Engineering* 100 (2015): 1247–1252. DOI: 10.1016/j.proeng.2015.01.490

10. Chernyi, S. G. “Analysis of the energy reliability component for offshore drilling platforms within the Black Sea.” *Oil industry* 2 (2016): 106–110.

11. Goreva, Tatyana Igorevna, Nikolay Nikolaevich Portnjagin, and Georgiy Alexandrovich Pjukke. “Neural network model diagnosis technical systems.” *Bulletin KRASEC. Physical and Mathematical Sciences* 1(4) (2012): 31–43.

12. Saharov, Vladimir Vasilevich, Alexandr Alexandrovich Chertkov, and Sergey Valerevich Saburov. "Algorithmic and synthesis of control systems of ship dynamic objects by means of mathematical programming." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 3(37) (2016): 201–211. DOI: 10.21821/2309-5180-2016-7-3-201-211.

13. Zhukov, Vladimir A., Ivan I. Kostylev, Aleksandr A. Ivanchenko, and Oleg K. Bezyukov. "Engines for Water Transport of Russia." *2018 IEEE International Conference» Quality Management, Transport and Information Security, Information Technologies»(IT&QM&IS)*. IEEE, 2018. 290–294. DOI: 10.1109/ITM-QIS.2018.8525101.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Железняк Александр Александрович —
кандидат технических наук
ФГБОУ ВО «Керченский государственный
морской технологический университет»
298309, Российская Федерация, Керчь,
ул. Орджоникидзе, 82
e-mail: zheleznyak13@mail.ru

Ениватов Валерий Владимирович —
кандидат технических наук
ФГБОУ ВО «Керченский государственный
морской технологический университет»
298309, Российская Федерация, Керчь, ул.
Орджоникидзе, 82
e-mail: Valeriy.enivatov@gmail.com

Доровской Владимир Алексеевич —
доктор технических наук, профессор
ФГБОУ ВО «Керченский государственный
морской технологический университет»
298309, Российская Федерация, Керчь,
ул. Орджоникидзе, 82
e-mail: dora1943@mail.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Zhelezniak, Aleksandr A. —
PhD
Kerch State Maritime Technological
University
82 Ordzhonikidze Str., Kerch, 298309,
Russian Federation
e-mail: zheleznyak13@mail.ru

Yenivatov, Valerii V. —
PhD
Kerch State Maritime Technological
University
82 Ordzhonikidze Str., Kerch, 298309,
Russian Federation
e-mail: Valeriy.enivatov@gmail.com

Dorovskoy, Vladimir A. —
Dr. of Technical Sciences, professor
Kerch State Maritime Technological
University
82 Ordzhonikidze Str., Kerch, 298309,
Russian Federation
e-mail: dora1943@mail.ru

Статья поступила в редакцию 13 июня 2019 г.

Received: June 13, 2019.

DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-6-1133-1140

THE ISSUE STATE AND OPTIONS FOR REDUCING HARMFUL EMISSIONS OF DIESEL MARINE POWER PLANTS

G. V. Medvedev, N. N. Gorlova

Polzunov Altai State Technical University, Barnaul, Russian Federation

Marine power plants have a negative impact on the environmental situation in the areas of ports, repair bases and reservoirs, as emit a large amount of harmful substances. Emissions of harmful substances with exhaust gases are controlled and limited by the requirements of GOST and MARPOL 73/78, however, it is very difficult to reduce them in the marine power plants, which are already in the long-term operation and especially which are discontinued. The main modern methods of reducing the toxicity of the exhaust gases of diesel marine power plants are given. Comparison of the effectiveness of the main methods for exhaust gases purification of marine power plants with an assessment of their prevented environmental damage is made and the most promising ones are identified. The possibility of applying the method of catalytic neutralization of exhaust gases of marine power plants, in multi-stage converters, on material obtained by the technology of self-propagating high-temperature synthesis is considered. In order to determine the optimal composition of the catalytic material the properties (physical and physical-mechanical) of materials based on steel oxide and molding clay are studied in accordance with standard methods. The obtained results allow us to conclude that metal processing waste - dross of alloy steel is preferable to use as the basic component. Such a catalytic material provides an optimal degree of reduction of harmful emissions of marine diesel engines. Technological features of the use of SHS - catalytic material and the operation of the entire exhaust gas purification system of marine diesel engines are presented, indicating the efficiency and adaptability of catalytic neutralization. The results of the impact of individual measures aimed at improving the efficiency of the catalytic purification of the exhaust gases of 6CH 15/18 diesel ship power plant on the specific estimated emissions of the last one are presented.

Keywords: diesel, catalysts, neutralization, exhaust gas, purification, efficiency improvement, vessel, power plant.

For citation:

Medvedev, Gennady V., and Nina N. Gorlova. "The issue state and options for reducing harmful emissions of diesel marine power plants." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admiral S. O. Makarova* 11.6 (2019): 1133–1140. DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-6-1133-1140.

УДК 629.5.03:621.43.068.4

СОСТОЯНИЕ ПРОБЛЕМЫ И ВАРИАНТЫ СНИЖЕНИЯ ВРЕДНЫХ ВЫБРОСОВ ДИЗЕЛЬНЫХ СУДОВЫХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВОК

Г. В. Медведев, Н. Н. Горлова

Алтайский государственный технический университет им И. И. Ползунова,
Барнаул, Российская Федерация

Отмечается, что судовые энергетические установки оказывают отрицательное воздействие на экологическую ситуацию в районах портов, ремонтных баз и водоемов, т.к. выбрасывают большое количество вредных веществ. Выбросы вредных веществ с отработавшими газами находятся под контролем и ограничиваются требованиями ГОСТ и Международной конвенции MARPOL 73/78, однако очень сложно добиться их снижения в находящихся долгое время в эксплуатируемых судовых энергетических установках, тем более, снятых уже с производства. Приводятся основные современные способы снижения токсичности отработавших газов дизельных судовых энергетических установок. Выполнено сравнение эффективности основных методов очистки отработавших газов судовых энергетических установок с оценкой предотвращенного экологического ущерба и определены наиболее перспективные методы. Рассматривается возможность применения метода каталитической нейтрализации отработавших газов судовых энергетических установок в многоступенчатых нейтрализаторах

на основе материала, полученного по технологии самораспространяющегося высокотемпературного синтеза. С целью определения оптимального состава каталитического материала проведено изучение свойств (физических и физико-механических) материалов на основе окарины стали и формовочной глины в соответствии со стандартными методиками. Полученные результаты позволили сделать вывод о предпочтительности использования в качестве базового компонента отходов обработки металлов — окарины легированной стали. Такой каталитический материал обеспечивает оптимальную степень снижения выбросов вредных веществ судовых дизелей. Приведены технологические особенности использования СВС — каталитического материала и эксплуатации всей системы очистки отработавших газов судовых дизелей, свидетельствующие об экономичности и технологичности каталитической нейтрализации. Приведены результаты воздействия отдельных мероприятий, направленных на повышение эффективности каталитической очистки отработавших газов дизельной судовой энергетической установки 6Ч 15/18, на удельные оценочные выбросы последней.

Ключевые слова: дизель, катализаторы, нейтрализация, отработавшие газы, очистка, повышение эффективности, судно, энергетическая установка.

Для цитирования:

Медведев Г. В. Состояние проблемы и варианты снижения вредных выбросов дизельных судовых энергетических установок / Г. В. Медведев, Н. Н. Горлова // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2019. — Т. 11. — № 6. — С. 1133–1140. DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-6-1133-1140.

Введение (Introduction)

В настоящее время можно утверждать, что в судовых энергетических установках (СЭУ) на речном и морском транспорте в качестве как главных, так и вспомогательных широко применяются дизельные поршневые двигатели внутреннего сгорания (ДВС) различных модификаций. Следует учитывать, что СЭУ оказывают отрицательное воздействие на экологическую ситуацию в районах портов, ремонтных баз и водоемов, так как в результате их использования наблюдается большое количество вредных веществ (около 4 % от общего количества вредных выбросов отработавших газов: CO, NO_x, C_xH_y всех видов транспорта). Такое количество выбрасываемых вредных веществ не может не оказывать отрицательного воздействия как на особенности флоры и фауны, водных бассейнов, так и на здоровье проживающих в этих районах людей.

Нормы учета вредных веществ находятся под контролем и ограничиваются требованиями ГОСТа 31967–2012, а также «Технического кодекса по контролю за выбросами окислов азота из судовых дизельных двигателей» (в составе приложения МАРПОЛ 73/78). Тем не менее очень сложно снизить уровень выбросов уже находящихся в эксплуатации СЭУ и тем более снятых с производства, но по-прежнему эксплуатируемых [1]–[5]. Об этом свидетельствует информация из Регистровой книги Российского речного регистра (РРР) Обского пароходства, согласно которым в настоящее время находятся официально в эксплуатации более тысячи судов (табл. 1) [6], на которых применяются около 29 типоразмеров поршневых дизельных двигателей (табл. 2), СЭУ различного срока производства, выбросы которых невозможно снизить в соответствии с нормами, указанными в действующем законодательстве [7].

Таблица 1

**Сведения по судовым энергетическим установкам (дизелям)
Обского пароходства (главные и вспомогательные)
согласно Регистровой книге РРР**

Сведения по СЭУ	Алтайский край и Республика Алтай	г. Новосибирск и Новосибирская обл.	г. Томск и Томская обл.	г. Кемерово и Кемеровская обл.	Итого
Всего судов	146	234	755	19	1154
Всего судов с дизелями	85	133	346	15	579
Всего дизелей	105	198	443	15	761

Таблица 2

**Сведения по размерностям судовых энергетических установок (дизелей)
Обского пароходства (главные и вспомогательные)
согласно Регистровой книге РРР**

Размер- ность	Алтайский край и Республика Алтай	г. Новосибирск и Новосибирская обл.	г. Томск и Томская обл.	г. Кемерово и Кемеровская обл.	Кол-во, шт.	Доля, %
23/30	5	9	33	—	47	6,18
24/36	10	28	11	—	49	6,44
15/18	21	21	36	3	81	10,64
18/26	5	23	68	—	96	12,61
18/22	27	53	72	—	152	19,97
13/14	15	23	150	10	198	26,02
Остальные	22	41	73	2	138	18,13
Итого:					761	100,00

Методы и материалы (Methods and Materials)

В последнее десятилетие во всем мире допустимые нормативные значения выбросов оксидов азота для дизелей значительно ужесточились (ГОСТ Р 51249–99, МАРПОЛ 73/78, ЕРА, ЕВРО-нормы). Ужесточившиеся нормы заставили крупные двигателестроительные компании разрабатывать новые и совершенствовать уже существующие способы снижения токсичности отработавших газов дизелей. Для таких систем западными производителями [8] разработаны каталитические фильтры, демонстрирующие механическую и термомеханическую стабильность при высокой степени очистки, что, к сожалению, может быть достигнуто лишь при условии согласования работы производителей двигателей и поставщиков соответствующего оборудования. В настоящее время всю совокупность способов снижения токсичности отработавших газов СЭУ можно свести к следующим основным направлениям:

- конструктивные изменения систем и конструкции двигателя;
- использование альтернативных видов топлива и присадок;
- регулировка топливной аппаратуры;
- капитальный ремонт и восстановление деталей цилиндро-поршневой группы и топливной аппаратуры;
- каталитическая нейтрализация отработавших газов (последнее направление представляется наиболее перспективным).

В результате сравнения эффективности основных методов очистки отработавших газов СЭУ с оценкой их предотвращенного экологического ущерба (табл. 3), можно сделать вывод о том, что метод каталитической нейтрализации является максимально эффективным [9], [10].

Таблица 3

Методы очистки отработавших газов СЭУ (дизелей)

Метод	Изменение выбросов вредных веществ, %			Предотвращенный экологический ущерб, тыс. руб./год
	NO _x	CO	C _x H _y	
Абсорбция	25	0	60	116,1
Жидкостная нейтрализация	30	72	0	145,7
Пламенная нейтрализация (термическая)	30	30	0	140,8
Эжекционно-пламенное дожигание	30	30	0	140,8
Каталитическая нейтрализация	65	90	80	155,1

Таблица 3
(Окончание)

Термокаталитическая нейтрализация (кипящий слой)	0	90	80	12,8
Подача воздуха в выпускной трубопровод	0	20	0	2,3
Элементы из керамики с пропиткой или нанесением катализатора	20	60	70	100,6
Дожигание в выпускном коллекторе	12	70	0	63,1

Система каталитической нейтрализации (Selective Catalytic Reduction (SCR)) представляет собой новый уровень систем очистки отработавших газов СЭУ. SCR является «умной» системой очистки, так как обладает избирательным действием, что позволяет повысить скорость определенных окислительно-восстановительных химических реакций в реакторе каталитического нейтрализатора [11]. Однако, чтобы обеспечить надежное функционирование SCR-системы каталитической нейтрализации отработавших газов необходимо применение принципиально новых каталитических материалов, использование различных составов и носителей, например, на основе отходов машиностроения и металлообработки (окалины легированной стали), литейного производства (формовочной глины) [12].

Исследование физических и физико-механических свойств изучаемых материалов (на основе окалины стали и формовочной глины) проводилось в соответствии со стандартными методиками:

- среднего приведенного диаметра пор методом сканирования шлифов образцов и обработки результатов электронной микроскопии;
- извилистости пор в материале — методом получения и обработки слепков сырой резины ИРП-1068 с последующей вулканизацией;
- удельной поверхности материала — по ГОСТу 23401–90;
- пористости материала — по ГОСТу 25281–82;
- механической прочности на сжатие — по ГОСТу 25.503–97;
- механической прочности на изгиб — по ГОСТу 9454–78.

Исследования функциональных свойств материалов по очистке отработавших газов СЭУ от вредных веществ проводились в соответствии с ГОСТами 30574–98 и 31967–2012.

Данные о составах шихты, характеристиках и свойствах СВС-каталитических материалов на основе окалины легированной стали [13] и формовочной глины [14] приведены в (табл. 4) [6].

Таблица 4

Данные о составах шихты, характеристиках и свойствах СВС-каталитических материалов

Отдельные характеристики	Базовая основа состава шихты	
	Окалина легированной стали	Формовочная глина
Содержание компонентов шихты в процентах по массе		
Окалина легированной стали (18ХНВА, 18ХНМА, 40ХНМА и др.)	42,50–52,50	12,10–12,80
Оксиды формовочной глины	–	54,10–58,5
Оксид хрома	18,00	–
Хром	6,7–6,90	6,90
Никель	12,40	12,40
Алюминий	8,10–17,90	8,60–12,30
Иридий	0,20	–
Родий	0,10	–
Медь	2,00	–
Церий	–	0,30
Физические характеристики		
Средний приведенный диаметр пор, мкм	112–177	110–159

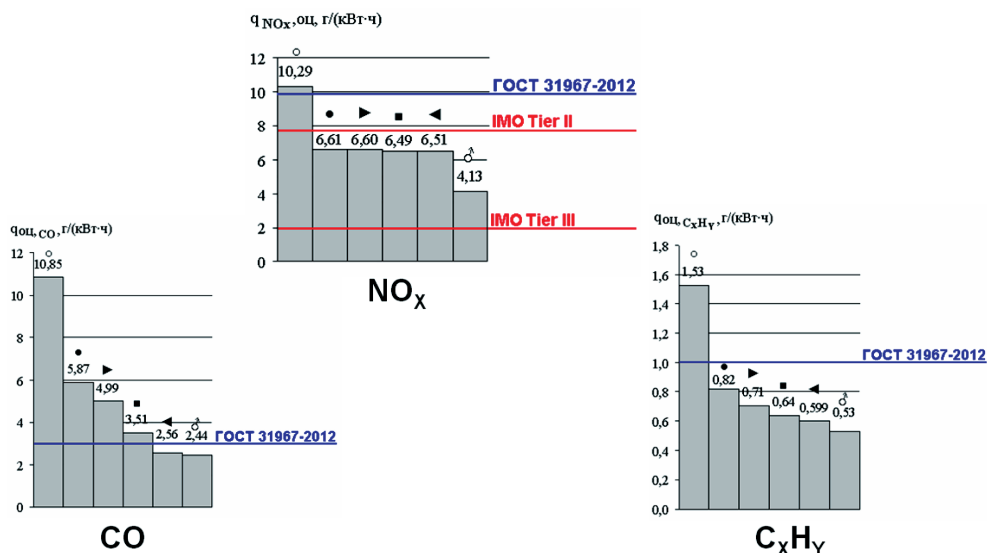
Таблица 4
(Окончание)

Извилистость пор при $\delta_{\text{см}} = 10$ мм	1,12–1,35	1,11–1,32
Удельная поверхность материала, м ² /г	85–133	80–121
Пористость	0,29–0,47	0,26–0,44
Физико-механические свойства		
Механическая прочность при сжатии, МПа	6,7–13,8	5,7–8,9
Механическая прочность при изгибе, МПа	2,9–3,7	2,2–2,8
Функциональные свойства материала при полной мощности дизеля		
Степень очистки от CO, %	80–85	68–72
Степень очистки от NO _x , %	28–56	25–42
Степень очистки от C _x H _y , %	56–58	40–49

По результатам исследований получены данные, на основе которых можно сделать вывод о том, что наиболее предпочтительным является материал на основе окарины легированной стали с точки зрения обеспечения более эффективной очистки отработавших газов от вредных веществ. Применение новых пористых проницаемых каталитических материалов, полученных по технологии самораспространяющегося высокотемпературного синтеза (СВС) в системах SCR-нейтрализации отработавших газов СЭУ, позволяет снизить выбросы оксидов азота на 50–60 % от исходного уровня при испытаниях дизеля по Правилам ЕЭК ООН № 49.

Результаты (Results)

Предлагаемый каталитический материал на основе отходов машиностроения (окарины легированной стали), полученный по технологии СВС, является чрезвычайно перспективным для использования в системах SCR-нейтрализации СЭУ, так как он позволяет обеспечить качество очистки отработавших газов в процессе функционирования с учетом требований, предъявляемым к системам очистки отработавших газов и материалам нейтрализаторов.



Воздействие отдельных мероприятий на повышение эффективности очистки отработавших газов судового дизеля 6C15/18 на удельные оценочные выбросы

Условные обозначения:

- — дизель без каталитического нейтрализатора; ● — дизель с многоступенчатым нейтрализатором
- СВС — каталитическим материалом на основе окарины легированной стали;
- — подача воздуха на входе в нейтрализатор;
- — подача 10%-го раствора соли Се на входе в нейтрализатор;
- ◄ — подача воздуха на входе в нейтрализатор, нагрев каталитических блоков;
- ♂ — нагрев блоков, подача воздуха и соли церия на входе в нейтрализатор

Апробация материала для каталитического многоступенчатого SCR-нейтрализатора использованием СВС-каталитического материала на основе окалины легированной стали осуществлялась в рамках воздействия отдельных мероприятий, направленных на повышение эффективности каталитической очистки отработавших газов судовой энергетической установки (наиболее используемого «грязного» дизеля 3Д6 (6Ч 15/18)) [6]. Результаты воздействия [6] приведены на диаграммах на с. 1137.

Обсуждение (Discussion)

Исходя из полученных результатов, а также с учетом более жестких требований МАРПОЛ 73/78 относительно требований ГОСТа 31967–2012 можно сделать вывод о том, что метод каталитической очистки отработавших газов с использованием SCR-каталитических пористых проницаемых металлокерамических материалов, полученных по технологии СВС, является более эффективным, чем метод с использованием в настоящее время материалов на основе металлических носителей или керамики. Замена СВС-каталитических блоков нейтрализатора возможна без привлечения сторонних специалистов с использованием запаса деталей, в том числе запасных фильтрующих блоков, которые должны быть на судне вместе с ЗИП (запасные части, инструменты и принадлежности).

Материал, созданный по технологии СВ-синтеза [6], уникален тем, что изготовление, переработка и регенерация СВС-фильтров может осуществляться без привлечения дополнительных специалистов и ресурсов в местах ремонта и стоянки судов, а при необходимости непосредственно на судне. Составной частью рассматриваемой проблемы является то, что место установки каталитического нейтрализатора относительно СЭУ не учитывается, что, в свою очередь, оказывает влияние на продолжительность времени прогрева блоков нейтрализатора и изменение расчетной температуры отработавших газов. Данную проблему можно решить путем тепловой изоляции системы выпуска на участке от СЭУ до каталитического нейтрализатора на этапе модернизации судна. Этот процесс не представляет технологических сложностей и может быть осуществлен силами экипажа судна при проведении очередного технического обслуживания СЭУ.

Заключение (Conclusion)

В результате оценки состояния проблемы снижения вредных выбросов дизельных СЭУ и сравнения эффективности применяемых методов было выявлено, что метод каталитической нейтрализации является оптимальным с точки зрения снижения концентрации вредных веществ в отработавших газах, особенно для обеспечения постоянно ужесточающихся норм снижения выбросов отработавших газов согласно Международной конвенции МАРПОЛ 73/78.

В результате проведенных исследований можно сделать вывод, что предложенный пористый проницаемый СВС-каталитический материал на основе окалины легированной стали в большей степени распространенный и доступный является в настоящее время наиболее эффективным для применения в системах очистки отработавших газов СЭУ. Кроме того, системы каталитической нейтрализации на основе СВС-материалов имеют огромное преимущество по сравнению с известными способами очистки отработавших газов, так как позволяют повышать качество очистки отработавших газов от вредных веществ СЭУ путем организации селективной очистки отработавших газов. В перспективе исследования предполагается рассмотрение и решение проблемы снижения функциональности каталитического нейтрализатора ввиду химической, физической или механической дезактивации каталитических блоков, вибрационного и термического разрушения носителей катализаторов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Международная конвенция по предотвращению загрязнения с судов (МАРПОЛ 73/78). — Кн. III, пересмотр. изд. — СПб.: ЗАО «ЦНИИМФ», 2012. — 336 с.

2. Живлюк Г. Е. Особенности развития экологически безопасных современных дизельных энергетических установок / Г. Е. Живлюк, А. П. Петров // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2017. — Т. 9. — № 3. — С. 581–596. DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-3-581-596.

3. Иванченко А. А. Энергетическая эффективность судов и регламентация выбросов парниковых газов / А. А. Иванченко, А. П. Петров, Г. Е. Живлюк // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2015. — № 3(31). — С. 103–112. DOI: 10.21821/2309-5180-2015-7-3-103-112.

4. Живлюк Г. Е. Экологическая безопасность судовых ДВС. Выбор эффективного способа соответствия новым требованиям 2020 г. по выбросам серы / Г. Е. Живлюк, А. П. Петров // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2019. — Т. 11. — № 4. — С. 727–744. DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-4-727-744.

5. Петров А. П. Экологическая безопасность. Ограничение выбросов серы судовыми энергетическими установками / А. П. Петров, Г. Е. Живлюк // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2019. — Т. 11. — № 1. — С. 130–145. DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-1-130-145.

6. Медведев Г. В. Металлокерамические фильтры очистки токсичных газов: водный транспорт: монография / Г. В. Медведев; под. ред. В. П. Горелова. — М.; Берлин: Директ-Медиа, 2017. — 247 с. DOI: 10.23681/459342.

7. Живлюк Г. Е. Анализ возможностей снижения выбросов вредных веществ, эксплуатируемых СДЭУ / Г. Е. Живлюк, А. П. Петров // Двигателестроение. — 2015. — № 1 (259). — С. 30–34.

8. Heibel A. Lösungen zur Einhaltung der Grenzwerte für Nutzfahrzeug – emissionen der nachten Dekade basierend auf ЕПА 2007 und EUV / A. Heibel, U. Zink // MTZ-Motortekhnische Zeitschrift. — 2007. — Vol. 68. — Is. 7–8. — Pp. 570–574. DOI: 10.1007/BF03227422.

9. Новиков Л. А. Оценка дополнительных затрат судовладельцев при использовании SCR-технологии на судах / Л. А. Новиков, В. С. Корчинский // Двигателестроение. — 2016. — № 3 (265). — С. 23–31.

10. Телидис К. К. Перспективный метод очистки вредных выбросов в атмосферу из судовых дизелей с помощью гидрогазоочистителя / К. К. Телидис // Материалы IV межвузовской научно-практической конференции аспирантов, студентов и курсантов «Современные тенденции и перспективы развития водного транспорта России», 15–16 мая 2013 г. — СПб.: ГУМРФ им. адм. С.О. Макарова, 2013. — С. 223–228.

11. Панчишный В. И. Нейтрализация оксидов азота в отработавших газах дизелей / В.И. Панчишный // Двигателестроение. — 2005. — № 2 (220). — С. 35–42.

12. Камышов Ю. Н. Система очистки отработавших газов дизелей судовых энергетических установок на основе пористых проницаемых коррозионностойких материалов / Ю. Н. Камышов, Г. В. Медведев, Н. Н. Горлова // Труды Крыловского государственного научного центра. — 2019. — № S2. — С. 187–197. DOI: 10.24937/2542-2324-2019-2-S-I-187-197.

13. Пат. 2530187 Российская Федерация, МПК В22F 3/23, С22С 1/05, С22С 29/12, С04В 38/00. Шихта с родием и иридием для получения пористого проницаемого каталитического материала / Н. Н. Горлова, А. Л. Новоселов, Г. В. Медведев, Д. С. Печенникова, А. А. Новоселов; заяв. и патентообл. ФГБОУ ВПО «Алтайский государственный технический университет им. И. И. Ползунова» (АлтГТУ). — № 2013139974/02; заявл. 27.08.2013; опубл. 10.10.2014, Бюл. № 28.

14. Пат. 2530184 Российская Федерация, МПК В22F 3/23, С22С 1/05, С22С 29/12, С04В 38/00. Шихта для получения пористого проницаемого каталитического материала / Н. Н. Горлова, А. Л. Новоселов, Г. В. Медведев, Д. С. Печенникова, А. А. Новоселов; заяв. и патентообл. ФГБОУ ВПО «Алтайский государственный технический университет им. И. И. Ползунова» (АлтГТУ). — № 2013139722/02; заявл. 27.08.2013; опубл. 10.10.2014, Бюл. № 28.

REFERENCES

1. *International Convention for Prevention of Pollution from Ships (MARPOL-73/78)*. SPb.: ZAO «TsNIIMF», 2012.

2. Zhivljuk, Grigorij E., and Aleksandr P. Petrov. “Features of the development of environmentally safe modern diesel power plants.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admiral S. O. Makarova* 9.3 (2017): 581–596. DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-3-581-596.

3. Ivanchenko, A. A., A. P. Petrov, and G. E. Zhivlyuk. "Energy efficiency of ships and regulation of greenhouse gas emissions." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 3(31) (2015): 103–112. DOI: 10.21821/2309-5180-2015-7-3-103-112
4. Petrov, Aleksandr P., and Grigorij E. Zhivljuk. "Ecological safety of ship internal combustion engines. Selecting the efficient method for compliance with the new requirements of 2020 for sulfur emissions." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 11.4 (2019): 727–744. DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-4-727-744.
5. Petrov, Aleksandr P., and Grigorij E. Zhivljuk. "Environmental safety. Limitation of sulfur emissions by the ship power plants." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 11.1 (2019): 130–145. DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-1-130-145
6. Medvedev, G. V. *Metallokeramicheskie fil'try ochistki toksichnykh gazov: vodnyi transport: monografiya*. Edited by V. P. Gorelov. M.; Berlin: Direkt-Media, 2017. DOI: 10.23681/459342
7. Jivlyuk, G. E., and A. P. Petrov. "Reserves of Improvement in Emission Performance of Marine Diesel Engines." *Dvigatelistroyeniye* 1(259) (2015): 30–34.
8. Heibel, Achim, and Uwe Zink. "Lösungen zur Einhaltung der Grenzwerte für Nutzfahrzeugemissionen der nächsten Dekade basierend auf EPA 2007 und EUV." *MTZ-Motortechnische Zeitschrift* 68.7-8 (2007): 570–574. DOI: 10.1007/BF03227422
9. Novikov, L. A., and V. S. Korchinsky. "Evaluation of Shipowner's Additional Expences Involved in SCR Technology Implementation." *Dvigatelistroyeniye* 3(265) (2016): 23–31.
10. Telidis, K. K. "Perspektivnyi metod ochistki vrednykh vybrosov v atmosferu iz sudovykh dizelei s pomoshch'yu gidrogazoochistitelya." *Materialy IV mezhvuzovskoi nauchno-prakticheskoi konferentsii aspirantov, studentov i kursantov «Sovremennye tendentsii i perspektivy razvitiya vodnogo transporta Rossii»*. SPb.: GUMRF im. adm. S. O. Makarova, 2013. 223–228.
11. Panchishnyi, V. I. "Neutralisation of Nitrogen Oxides in Engine Exhaust Gases." *Dvigatelistroyeniye* 2(220) (2005): 35–42.
12. Kamyshev, Yuri N., Gennady V. Medvedev, and Nina N. Gorlova. "Purification of marine diesel exhaust gases by means of porous permeable corrosion-resistant materials." *Transactions of the Krylov State Research Centre* S2 (2019): 187–197. DOI: 10.24937/2542-2324-2019-2-S-I-187-197
13. Gorlova, N. N., A. L. Novoselov, G. V. Medvedev, D. S. Pechennikova, and A. A. Novoselov. RU 2 530 187 C1, IPC B 22F 3/23, C 22C 1/05, C 22C 29/12, C 04B 38/00. Shikhta s rodiiem i iridiem dlya polucheniya poristogo pronitsaemogo kataliticheskogo materiala. Russian Federation, assignee. Publ. 10 Oct. 2014.
14. Gorlova, N. N., A. L. Novoselov, G. V. Medvedev, D. S. Pechennikova, and A. A. Novoselov. RU 2 530 184 C1, IPC B 22F 3/23, C 22C 1/05, C 22C 29/12, C 04B 38/00. Shikhta dlya polucheniya poristogo pronitsaemogo kataliticheskogo materiala. Russian Federation, assignee. Publ. 10 Oct. 2014.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Медведев Геннадий Валериевич —
кандидат технических наук, доцент
Алтайский государственный технический
университет им. И. И. Ползунова
656038, Российская Федерация, Алтайский край,
г. Барнаул, пр. Ленина, 46
e-mail: Genatswaly@mail.ru
Горлова Нина Николаевна —
кандидат технических наук, доцент,
Алтайский государственный технический
университет им. И. И. Ползунова,
656038, Российская Федерация, Алтайский край,
г. Барнаул, пр. Ленина, 46
e-mail: Gnn.09@mail.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Medvedev, Gennady V. —
PhD, associate professor
Polzunov Altai State Technical
University
46 Lenin Av., Barnaul, 656038,
Russian Federation
e-mail: Genatswaly@mail.ru
Gorlova, Nina N. —
PhD, associate professor
Polzunov Altai State Technical
University
46 Lenin Av., Barnaul, 656038,
Russian Federation
e-mail: Gnn.09@mail.ru

Статья поступила в редакцию 18 ноября 2019 г.
Received: November 18, 2019.

ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ КОМПЛЕКСЫ И СИСТЕМЫ

DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-6-1141-1151

EFFICIENCY EVALUATION OF A CATHODIC PROTECTION DEVICE FOR MARINE STRUCTURES USING POWER FROM SOLAR PANELS

V. M. Vu^{1,2}, B. B. Chernov¹, A. M. Nugmanov¹

¹ — Maritime State University named after adm. G.I. Nevelskoy,
Vladivostok, Russian Federation

² — Vietnam Maritime University, Haiphong, Vietnam

The operability of a cathodic protection device for marine structures powered only by a solar panel without the use of other direct current sources is experimentally studied. A quantitative assessment of the corrosion protection ability of such a device is carried out at four current densities of cathodic protection for low-alloy metals. To determine the possibility of using such protection of objects that may have corrosion products on their surface in comparison with objects that immediately after immersion in sea water are protected by cathodic protection, four test samples have a clean surface before testing, and the other four have corrosion products of low-alloy steel. It is shown that the protective effect of pure samples reaches 64% at a current density of 0,387 Amperes per square meter, and the protective effect of samples with corrosion products reaches 70% and 95% at protection current densities of 0,203 and 0,387 Amperes per square meter respectively. In order to ensure maximum protection of steels, cathodic current densities of more than 0,2 Amperes per square meter are required, which are easily achieved by using solar panels. The protective ability of such modes to protect the marine structures from corrosion is achieved by the formation of coatings of calcium carbonate and magnesium hydroxide in the daytime, which are able to protect objects in the night, currentless period of time. The using possibility of cathodic protection for protecting metals in seawater using solar panels when other direct current sources are not used is proved. Obviously, it is advisable to use such devices to protect offshore structures in the areas located away from stationary sources of electricity and human resources, while saving significant material resources.

Keywords: cathodic protection, corrosion, current density, solar panel, galvanostatic mode, calcareous deposits, protective coating, seawater, solar panel, galvanostatic mode.

For citation:

Vu, Van-Mung, Boris B. Chernov, and Anas M. Nugmanov. "Efficiency evaluation of a cathodic protection device for marine structures using power from solar panels." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 11.6 (2019): 1141–1151. DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-6-1141-1151.

УДК 620.197.5

ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ УСТАНОВКИ КАТОДНОЙ ЗАЩИТЫ МОРСКИХ СООРУЖЕНИЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПИТАНИЯ ОТ СОЛНЕЧНЫХ ПАНЕЛЕЙ

В. М. Ву^{1,2}, Б. Б. Чернов¹, А. М. Нугманов¹

¹ — Морской Государственный университет им. адм. Г. И. Невельского,
Владивосток, Российская Федерация

² — Вьетнамский морской университет, Хайфон, Вьетнам

Экспериментально изучена работоспособность пилотной установки по катодной защите металлов в морской воде, которая питается только от солнечной панели без использования других источников постоянного тока. Проведена количественная оценка защитной способности от коррозии малолегированных металлов при использовании четырех плотностей тока катодной защиты. Для определения

возможности применения такой защиты объектов, которые могут на своей поверхности иметь продукты коррозии по сравнению с объектами, которые сразу после погружения в морскую воду защищаются катодной защитой, четыре испытуемых образца перед испытаниями имели чистую поверхность, а другие четыре имели продукты коррозии. Показано, что защитный эффект чистых образцов достигает 64 % при плотности тока 0,387 А/м², а степень защиты образцов с продуктами коррозии достигает 70 % и 95 % при плотностях тока защиты 0,203 и 0,387 А/м². Для обеспечения максимальной защиты малолегированных сталей необходимы плотности катодного тока более 0,2 А/м², которые легко достигаются при использовании солнечных панелей. Защитная способность таких режимов для защиты от коррозии морских конструкций достигается за счет формирования покрытий из карбоната кальция и гидроксида магния в дневное время суток, которые способны защищать объекты и в ночной, бестоковый период времени. Доказана возможность использования катодной защиты при защите металлов в морской воде с использованием солнечных панелей, когда другие источники постоянного тока не используются. Очевидно, что целесообразно использовать такие устройства для защиты морских сооружений в районах, удаленных от стационарных источников электроэнергии и людских ресурсов, достигая при этом значительной материальной экономии средств.

Ключевые слова: катодная защита, коррозия, плотность тока, солнечная панель, гальваностатический режим, солевые катодные осадки, защитное покрытие, морская вода.

Для цитирования:

Ву В. М. Оценка эффективности установки катодной защиты морских сооружений с использованием питания от солнечных панелей / В. М. Ву, Б. Б. Чернов, А. М. Нугманов // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2019. — Т. 11. — № 6. — С. 1141–1151. DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-6-1141-1151.

Введение (Introduction)

В настоящее время катодная защита применяется не только непосредственно для предотвращения коррозии, но и специально направлена на рост покрытий из солевых катодных осадков (СКО) [1]–[4], обладающих возможностью снижать коррозию металлов или полностью защищать морские сооружения при отключении катодной защиты [5], [6]. Факторы, влияющие на образование СКО на катодно-защищенной поверхности стали, достаточно хорошо исследованы в работах [7]–[11]. Составы СКО исследованы авторами работ [12]–[14]. В последнее время наблюдается значительное увеличение количества научных работ по проблеме роста СКО и соотношения Ca/Mg в них [4], [7], [9], [15], а также рост интереса к применению солнечных панелей в качестве источника постоянного тока [16]–[20]. Однако при этом не учитывается использование только солнечных панелей в качестве единственного источника тока (без использования аккумуляторов, ветряных установок, гальванических пар) при катодной защите металлических поверхностей в морской воде. Попытки применения такой защиты для морских сооружений, которые ранее не подвергались защите, неизвестны.

Специалисты, занимающиеся установкой катодной защиты для морских сооружений, сталкиваются с проблемой, насколько быстро после ввода сооружения в эксплуатацию можно применять катодную защиту. Особую значимость эта проблема имеет при использовании в катодной защите солнечных панелей как единственных источников постоянного тока, поскольку закономерности формирования СКО на чистой поверхности металлов и на поверхности металлов с продуктами коррозии специально не исследовались. Оценка защитной способности катодной защиты от солнечных панелей для металлов, покрытых продуктами коррозии, и металлов с чистой поверхностью в природной морской воде при различных токовых режимах и явилась целью данной работы.

Методы и материалы (Methods and Materials)

Пилотная установка по катодной защите с питанием от солнечной панели была изготовлена на кафедре химии и экологии Морского государственного университета им. адм. Г. И. Невельского. Принципиальная схема установки представлена на рис. 1. Преобразователи напряжения 2 и 4, получающие питание при достижении своих порогов срабатывания (3,0 В для преобразовате-

ля 2 и 6,0 В для преобразователя 4) на своих выходах выдают 12 В и 6,0 В. При этом напряжение на анод А не подается до истечения установленного времени задержки $t_{\text{зад}}$ блока 3, которое устанавливалось с промежутком времени $t_{\text{зад}} = 6$ мин. При срабатывании электромагнитного реле блока 3 схема катодной защиты получает электропитание, которое распределяется по токам в соответствии с номиналами калиброванных резисторов R_1 – R_4 в цепи.

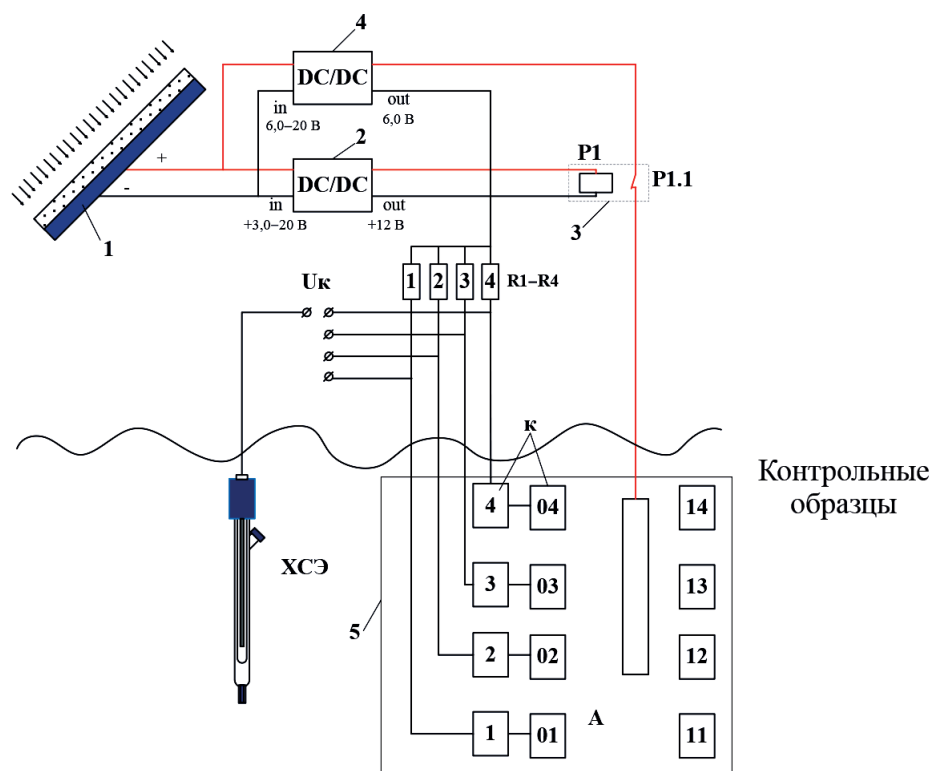


Рис. 1. Принципиальная схема устройства катодной защиты с питанием от солнечной панели:

- 1 — солнечная панель; 2 — преобразователь напряжения с выходом 12 В;
- 3 — блок задержки времен с электромагнитным реле;
- 4 — преобразователь напряжения с выходом 6,0 В;
- 5 — рамка с анодом, образцами под катодной защитой и контрольными образцами;
- А — анод; К 1–4 — защищенные образцы с чистой поверхностью,
- К 01–04 — защищенные образцы, которые были покрыты продуктами коррозии;
- R_1 – R_4 — резисторы

Номиналы резисторов: $R_1 = 2R_2 = 4R_3 = 8R_4$ ($R_1 = 5,4 \text{ к}\Omega$; $R_2 = 2,7 \text{ к}\Omega$; $R_3 = 1,35 \text{ к}\Omega$; $R_4 = 675 \Omega$), соответственно, должны быть кратны преобразователям напряжения 2 и плотности токов на катодных образцах: 58; 116; 231; 463 (мА/м²). Когда выходное напряжение солнечной панели 1 падает до 6,0 В, отключается преобразователь напряжения 4, а при падении до 3,0 В — преобразователь 2. Схема катодной защиты обесточивается до следующего цикла.

В качестве защищаемых образцов и контрольных были использованы образцы из стали СтЗхп (по ГОСТу 19903–74) с приблизительным составом (в массах %): Fe — 99,26; Mn — 0,441; Cr — 0,150; Cu — 0,146; размером 50 × 80 × 1,5 мм. Нерастворимым анодом 400 × 25 × 1,5 мм служил платинированный титан. Четыре образца из восьми, которые защищались катодно, выдерживалась в морской воде в течение семи суток, после чего «чистые» и частично прокорродировавшие образцы подключались к токовой защите. Образцы и анод крепились на рамке размером 520 × 400 мм при помощи полиэтиленового шнура (рис. 2). Рамка с испытуемыми образцами опускалась на глубину 2 м и закреплялась на пирсе. Образцы перед опытом обрабатывали соляной кислотой (1:3), промывали дистиллированной водой, сушили при 90 °С в течение 0,5 ч и взвешивали на аналитических весах AW-220 («Shimadzu»).

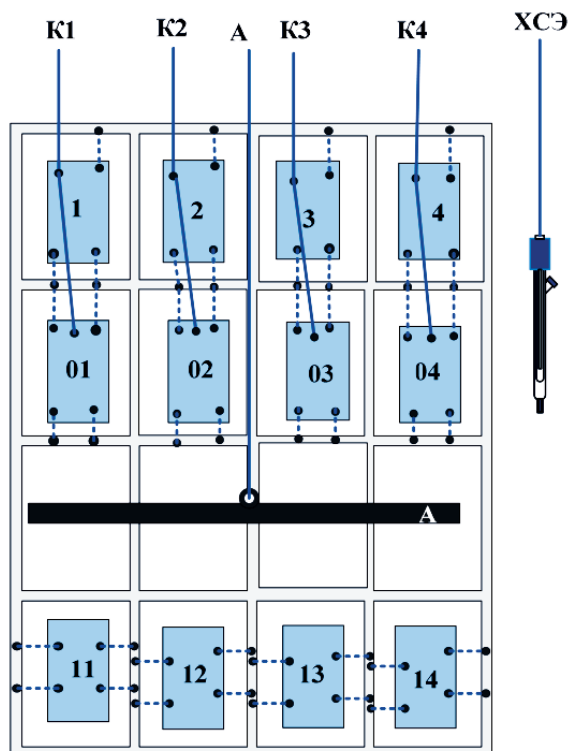


Рис. 2. Схема размещения нерастворимого анода, защищаемых и контрольных образцов на рамке:
А – анод; K1–K4 — катодные образцы под разными защитными токами (1–4 — чистые образцы, 01–04 — ржавые образцы); 11–14 — контрольные образцы (11, 12 — ржавые; 13, 14 — чистые); ХСЭ — хлорсеребряный электрод сравнения

Испытание установки проводили с использованием пирса яхт-клуба МГУ им. адм. Г. И. Невельского, г. Владивосток (см. рис. 3). Средние физические и химические свойства морской воды в период испытаний представлены в табл. 1 [21].

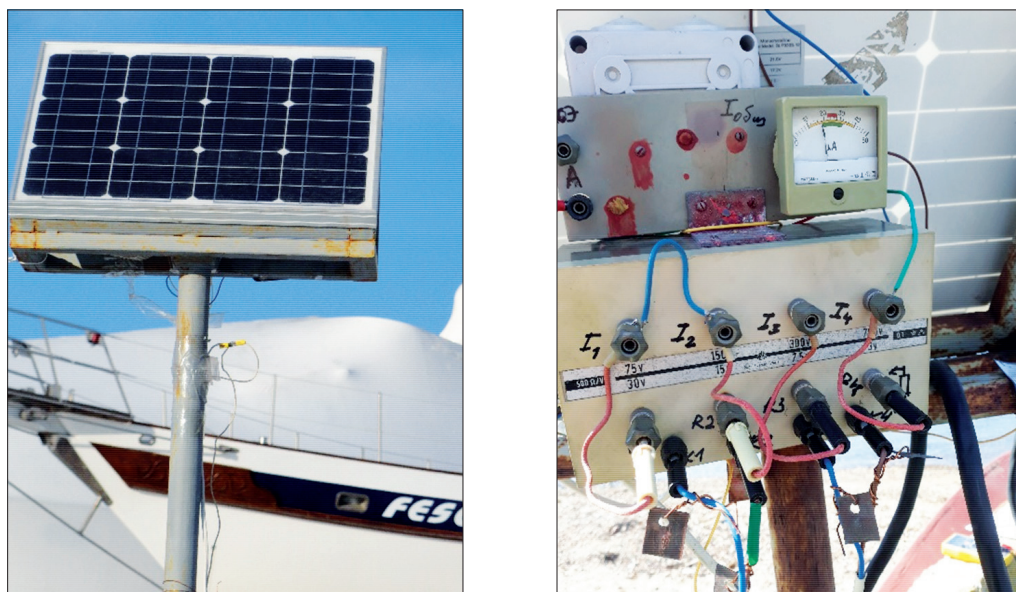


Рис. 3. Общий вид пилотной установки катодной защиты в морской воде с питанием от солнечной панели в яхт-клубе МГУ им. адм. Г. И. Невельского

Таблица 1

Параметры морской воды в месте и в период испытаний

Параметры	Значение
Глубина, м	2,0
Температура, °С	10–18
Скорость течения, м/с	< 0,1
Растворенный кислород, мг/л	5,6–8,8
рН	7,4–8,2
Соленость, ‰	28,1–32,3

В качестве источника постоянного тока применялась монокристаллическая солнечная панель (SOLARLAND, модель SLP030S-12), параметры которой представлены в табл. 2.

Таблица 2

Параметры солнечной панели

Параметры	Значение
Напряжение без нагрузки, В	21,6
Оптимальное рабочее напряжение, В	17,2
Ток короткого замыкания, А	1,93
Оптимальный рабочий ток, А	1,74
Максимальная мощность, Вт	30
Стандартное условие испытания, Вт/м ²	1000

В качестве электрода сравнения использовали хлорсеребряный электрод. После эксперимента с образцов удаляли продукты коррозии по ГОСТу 9.907–83 (100 мл конц. H₂SO₄ + 5 г CS(NH₂)₂ на 1 л воды), промывали, высушивали при 90 °С и взвешивали на аналитических весах для определения изменения массы образцов $\Delta m_{\text{кор}}$. Для образцов с продуктами коррозии в $\Delta m_{\text{кор}}$ входила поправка, связанная с потерей массы за 7 сут., равной 0,240 г. По изменениям массы оценивали толщины коррозионных потерь h и скорости коррозии V_k :

$$h = \frac{\Delta m_{\text{кор}}}{S\rho} \quad (1)$$

и

$$V_k = \frac{h}{\Delta t}, \quad (2)$$

где S — площадь образцов, см²; h — толщина коррозионных потерь, см; ρ — плотность металла (для стали $\rho = 7,8$ г/см³); Δt — время экспозиции, лет.

Степень защиты образцов определяли по формуле

$$\eta = \frac{V_{\text{с.к.}} - V_{\text{з.к.}}}{V_{\text{с.к.}}} 100 \%, \quad (3)$$

где $V_{\text{с.к.}}$ — средняя скорость коррозии четырех контрольных образцов; $V_{\text{з.к.}}$ — скорость коррозии защищенных образцов.

Результаты и их обсуждение (Results and discussion)

Установка эксплуатировалась 94 сут. Результаты проведенных измерений и расчетные значения коррозионных потерь и скоростей коррозии представлены в табл. 3 и 4 и на рис. 4 и 5.

Таблица 3

Плотности тока защиты образцов от времени испытаний

Плотность тока, А/м ²	Время работы устройства, сут.							Средние значения
	0	3	7	17	26	34	94	
i_1	0,0537	0,0517	0,0532	0,0523	0,0495	0,0516	0,0528	0,0521
i_2	0,106	0,100	0,104	0,103	0,0962	0,100	0,103	0,102
i_3	0,215	0,202	0,213	0,202	0,186	0,195	0,210	0,203
i_4	0,429	0,380	0,397	0,392	0,359	0,372	0,379	0,387

Из табл. 3 следует, что плотности тока в образцах практически не изменялись во время испытаний, хотя на поверхности образцов образовались СКО, происходило биообрастание и формировались продукты коррозии. Такую закономерность можно объяснить тем, что сопротивление продуктов, образующихся в процессе коррозии, много меньше, чем сопротивление резисторов $R1-R4$ установки [22]. Такая закономерность характеризует работу установки в гальваностатическом режиме для всех образцов при всех четырех режимах тока защиты.

а)



б)



Рис. 4. Общий вид всех образцов до опытов (а) и после опытов (б)

Из рис. 4 и 5 видно, что в ходе экспериментов наблюдалось биообрастание образцов, на их поверхности формировались продукты коррозии и солевые осадки (см. рис. 4). На поверхности незащищаемых образцов (рис. 5, г) и защищаемых образцов низким током 0,102 А/м² (рис. 5, в) наблюдалось большее количество продуктов коррозии красного цвета, по-видимому в виде Fe_2O_3 . На поверхности чистых образцов и с первоначальными продуктами коррозии, защищаемых током 0,387 А/м², продуктов коррозии было меньше (см. рис. 5, а, б). Однако это только качественная оценка коррозионных потерь. Точная оценка результатов по коррозионным потерям и скоростям коррозии образцов после удаления продуктов коррозии приведена в табл. 4.

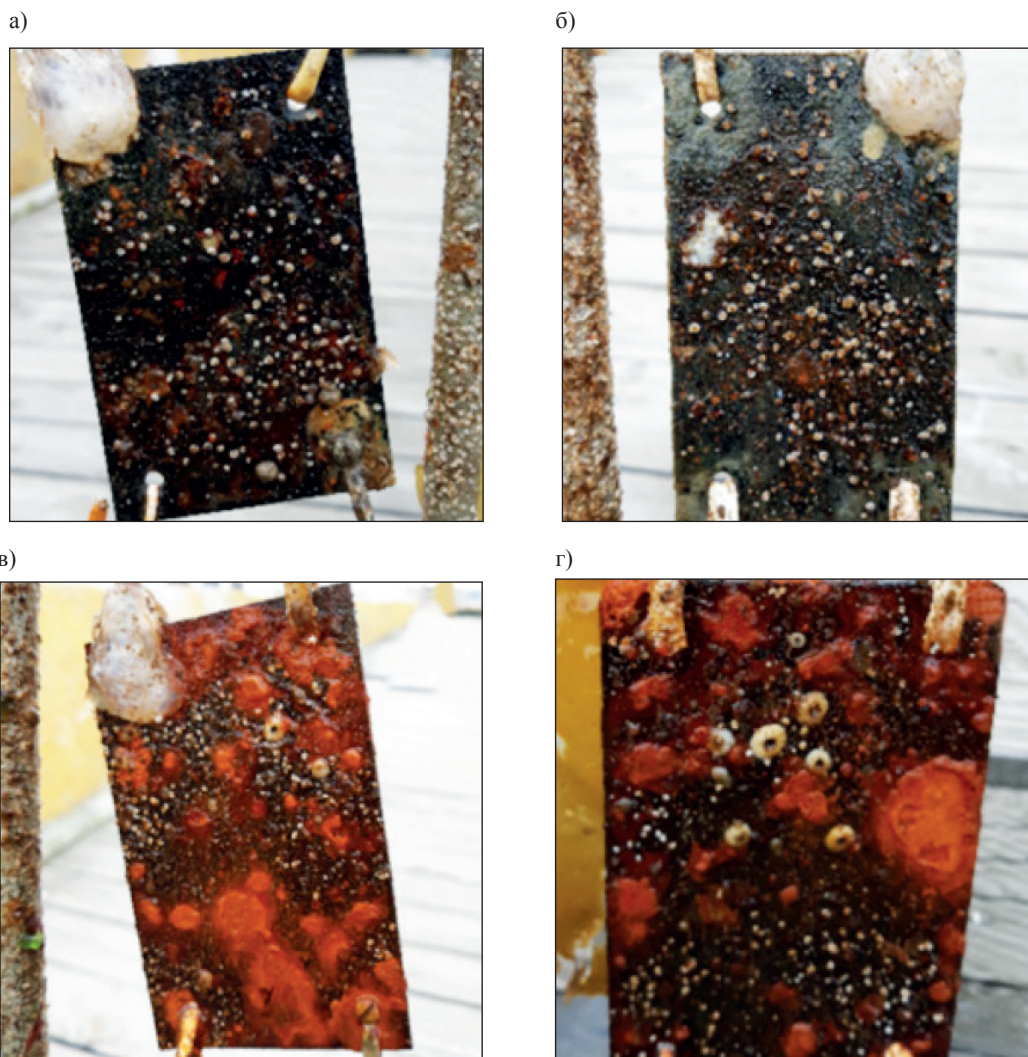


Рис. 5. Общий вид образцов после эксперимента: а — -4; б — -04; в — -2; г — -14

Таблица 4

Результаты испытаний защищенных и контрольных образцов, полученных на пилотной установке по катодной защите с использованием солнечной панели

i , А/м²	Масса образцов, г		Коррозионные потери		Скорость коррозии; V_k , мм/год	Степень защиты, %
	Исходная	После снятия солевого и оксидного покрытий	Δm , г	h , мкм		
Чистые образцы под защитным током						
0,0521	48,1365	46,2521	1,8844	30,2	0,117	0,1
0,102	48,8189	47,4126	1,4063	22,5	0,087	26
0,203	40,0869	39,3215	0,7654	12,3	0,048	59
0,387	48,9907	48,3153	0,6754	10,8	0,042	64
Предварительно прокорродировавшие образцы под защитным током						
0,0521	43,2368	41,4896	1,7472	28,0	0,109	8
0,102	49,3617	47,7273	1,6344	26,2	0,101	14
0,203	48,8978	48,3347	0,5631	9,0	0,035	70
0,387	44,5007	44,4023	0,0984	1,6	0,006	95
Контрольные образцы						
–	48,5127	46,6220	1,8907	30,3	0,118	–
–	48,8421	46,9764	1,8657	29,9	0,116	–
–	49,4359	47,5065	1,9294	30,9	0,120	–
–	47,8369	45,9155	1,9214	30,8	0,119	–

Из табл. 4 следует, что для рассматриваемых образцов всегда проявляется защитный эффект, который с ростом плотности защитного тока возрастает, достигая при плотности тока $0,387 \text{ А/м}^2$ степени защиты 64 %. Степень защиты более выражена при плотностях тока более $0,2 \text{ А/м}^2$ у чистых и предварительно прокорродировавших образцов. Для образцов с продуктами коррозии степень защиты достигает 70 % и 95 % при значениях плотности защиты, соответственно, $0,203 \text{ А/м}^2$ и $0,387 \text{ А/м}^2$. Среднее значение скорости коррозии контрольных образцов за время экспозиции составило $0,118 \text{ мм/год}$, что соответствует экспериментальным величинам, полученным ранее [21], [23]. Из результатов экспериментов следует, что при плотностях тока более $0,15 \text{ А/м}^2$ скорость коррозии образцов, которые предварительно подверглись коррозии, меньше, чем скорость коррозии чистых образцов. Снижение скорости коррозии предварительно прокорродировавших образцов можно объяснить образованием покрытий из продуктов коррозии и из СКО на поверхности образцов, которые обладают более защитными свойствами.

Заключение (Conclusion)

Экспериментально изучена работоспособность пилотной установки по катодной защите металлов в морской воде, которая питается только от солнечной панели без использования других источников постоянного тока. Проведена количественная оценка защитной способности от коррозии такой установки при четырех плотностях тока катодной защиты для малолегированных металлов. Для определения возможности использования защиты таких объектов, которые могут на своей поверхности иметь продукты коррозии по сравнению с объектами, подверженными катодной защите сразу после погружения их в морскую воду, четыре испытуемых образца изначально имели чистую поверхность, другие четыре — продукты коррозии.

Результаты проведенных исследований позволяют сделать следующие выводы:

1. Показано, что для обеспечения максимальной защиты малолегированных сталей необходимы плотности катодного тока более $0,2 \text{ А/м}^2$, которые легко достигаются при использовании солнечных панелей. Защитная способность таких режимов от коррозии морских конструкций достигается за счет формирования покрытий из CaCO_3 и Mg(OH)_2 в дневное время суток, которые сохраняют данную способность и в ночной, бестоковый период времени.
2. Показано, что катодная защита металлов в морской воде, питающаяся от солнечной панели как единственного источника постоянного тока, может защищать морские конструкции, которые после своего строительства в течение длительного периода времени находились без защиты.
3. Доказана возможность использования катодной защиты металлов в морской воде с использованием солнечных панелей, когда не используются другие источники постоянного тока. Очевидно, что целесообразно использование таких устройств для защиты морских сооружений в районах, удаленных от стационарных источников электроэнергии и людских ресурсов, экономя при этом значительные материальные средства.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Чернов Б. Б. Кристаллизация CaCO_3 на поверхности стали при катодной защите морских сооружений / Б. Б. Чернов, В. М. Ву, А. М. Нугманов, Л. Ю. Фирсова // Морские интеллектуальные технологии. — 2017. — № 2-3 (37). — С. 133–140.
2. Чернов Б. Б. Формирование солевых отложений на стальной поверхности при катодной защите инженерных сооружений в морской воде / Б. Б. Чернов [и др.] // Морские интеллектуальные технологии. — 2018. — № 5-4 (42). — С. 120–124.
3. Ву М. Формирование осадков на стальной поверхности при катодной защите / М. Ву, Б. Б. Чернов // Проблемы транспорта Дальнего Востока. — 2017. — № 2 (2). — С. 173–183.
4. Ву В. М. К теории массовой кристаллизации труднорастворимых соединений на поверхности катода в жесткой воде / В. М. Ву, А. М. Нугманов, Б. Б. Чернов // Журнал физической химии. — 2019. — Т. 93. — № 5. — С. 764–769. DOI: 10.1134/S0044453719050327.

5. *Hartt W. H.* Cathodic Protection of Offshore Structures—History and Current Status / W. H. Hartt // Corrosion. — 2012. — Vol. 68. — No. 12. — Pp. 1063–1075. DOI: 10.5006/0010-9312-68.12.1063.

6. *Grabowski, M.* Cathodic Corrosion of Magnesium Alloy AM50 in Deicing Salt Solutions During “Cathodic Protection” // M. Grabowski, S. Virtanen // Corrosion. — 2017. — Vol. 73. — Is. 5. — Pp. 563–582. DOI:10.5006/2301.

7. *Barchiche C.* Role of sulphate ions on the formation of calcareous deposits on steel in artificial seawater; the formation of green rust compounds during cathodic protection / C. Barchiche [et al] // Electrochimica Acta. — 2009. — Vol. 54. — Is. 13. — Pp. 3580–3588. DOI: 10.1016/j.electacta.2009.01.023.

8. *Zhang Y.* Influence of Mg^{2+} on the kinetics of calcite precipitation and calcite crystal morphology / Y. Zhang, R. A. Dawe // Chemical Geology. — 2000. — Vol. 163. — Is. 1-4. — Pp. 129–138. DOI: 10.1016/S0009-2541(99)00097-2.

9. *Eashwara, M.* Sunlight-enhanced calcareous deposition on cathodic stainless steel in natural seawater / M. Eashwara, P. Sathish Kumara, R. Ravishankarb, G. Subramaniand // Biofouling. — 2013. — Vol. 29. — Is. 2. Pp. 185–193. DOI: 10.1016/S0009-2541(99)00097-2

10. *Möller H.* The influence of Mg^{2+} on the formation of calcareous deposits on a freely corroding low carbon steel in seawater / H. Möller // Corrosion Science. — 2007. — Vol. 49. — Is. 4. — Pp. 1992–2001. DOI: 10.1016/j.corsci.2006.10.011.

11. *Okstad T.* Significance of Hydrogen Evolution during Cathodic Protection of Carbon Steel in Seawater / T. Okstad [et al] // Corrosion. — 2007. — Vol. 63. — Is. 9. — Pp. 857–865. DOI: 10.5006/1.3278436.

12. *Li C.* Influence of dissolved oxygen on the protectiveness and morphological characteristics of calcareous deposits with galvanostatic / C. Li, M. Du, R. Gao // Journal of Ocean University of China. — 2017. — Vol. 16. — Is. 2 — Pp. 243–248. DOI: 10.1007/s11802-017-2933-4.

13. *Refait P.* Electrochemical formation and transformation of corrosion products on carbon steel under cathodic protection in seawater / P. Refait [et al] // Corrosion Science. — 2013. — Vol. 71. — Pp. 32–36. DOI: 10.1016/j.corsci.2013.01.042.

14. *Liu F. G.* Characterisation of calcareous deposits on freely corroding low carbon steel in artificial sea water / F. G. Liu, S. R. Wu, C. S. Lu // Corrosion Engineering, Science and Technology. — 2011. — Vol. 46. — Is. 5. — Pp. 611–617. DOI: 10.1179/147842210X12754747500487.

15. *Akamine K.* Corrosion Protection of Steel by Calcareous Electrodeposition in Seawater (Part 2) / K. Akamine, I. Kashiki // Zairyo-to-Kankyo. — 2003. — Vol. 52. — Is. 8. — C. 401–407. DOI: 10.3323/jcorr1991.52.401.

16. *Laoun B.* Cathodic protection of a buried pipeline by solar energy / B. Laoun, K. Niboucha, L. Serir // Revue des Energies Renouvelables. — 2008. — Vol. 12. — No. 1. — Pp. 99–104.

17. *Yalçın H.* Solar power for cathodic protection of steel pipeline / H. Yalçın, T. Koç // Solar Energy. — 1993. — Vol. 51. — Is. 5. — Pp. 415–418. DOI: 10.1016/0038-092X(93)90155-H.

18. *Mishra P. R.* Design of a solar photovoltaic-powered mini cathodic protection system/ P.R. Mishra, J.C. Joshi, B. Roy // Solar Energy Materials and Solar Cells. — 2000. — Vol. 61. — Is. 4. — Pp. 383–391. DOI: 10.1016/S0927-0248(99)00121-X.

19. *El Ghitani H.* Microprocessor-based cathodic protection system using photovoltaic energy / H. El Ghitani, A. H. Shousha // Applied Energy. — 1995. — Vol. 52. — Is. 2-3. — Pp. 299–305. DOI: 10.1016/0306-2619(95)00033-O.

20. *Tian T.* Electrochemical Anti-corrosion System of Iron Tower Based on Solar Power Supply / T. Tian, S.Xiao // MATEC Web of Conferences. — EDP Sciences, 2018. — Vol. 160. — Pp. 03006. DOI: 10.1051/matec-conf/201816003006.

21. *Chernov B. B.* Corrosion performance of low alloy steels in sub-Arctic natural seawater / B. B. Chernov, I. A. Chaves, A. M. Nugmanov, R. E. Melchers // Corrosion. — 2018. — Vol. 74. — Is. 12. — Pp. 1466–1475. DOI: 10.5006/2951.

22. ВСН 39–84. Катодная защита от коррозии оборудования и металлических конструкций гидротехнических сооружений. — Л.: ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева, 1985.

23. *Нугманов А. М.* Изучение начальных стадий процессов коррозии стали в различных районах амурского залива / А. М. Нугманов, Г. П. Щетинина, Б. Б. Чернов // Вестник Морской государственной университет им. адм. Г.И. Невельского. Серия «Теория и практика защиты моря». — 2012. — № 55. — С. 30–35.

REFERENCES

1. Chernov, Boris Borisovich, Van Mung Vu, Anas Maskharovich Nugmanov, and Lyudmila Yurevna Firsova. "The crystallization CaCO_3 on the surface of steel at cathodic protection of sea constructions." *Marine intellectual technologies* 2-3(37) (2017): 133–147.
2. Chernov, Boris B., Van M. Vu, Anas M. Nugmanov, and Liudmila Yu. Firsova. "Formation of salt deposits on a steel surface at cathodic protection of engineering constructions in sea water." *Marine intellectual technologies* 5-4(42) (2018): 120–124.
3. Vu, M., and B. B. Chernov. "Formirovaniye osadkov na stal'noi poverkhnosti pri katodnoi zashchite." *Problemy transporta Dal'nego Vostoka* 2(2) (2017): 173–183.
4. Vu, V. M., A. M. Nugmanov, and B. B. Chernov. "Theory of the mass crystallization of poorly soluble compounds on a cathode's surface in hard water." *Russian Journal of Physical Chemistry* 93.5 (2019): 764–769. DOI: 10.1134/S0044453719050327.
5. Hartt, William H. "Cathodic Protection of Offshore Structures—History and Current Status." *Corrosion* 68.12 (2012): 1063–1075. DOI: 10.5006/0010-9312-68.12.1063.
6. Grabowski, M., and S. Virtanen. "Cathodic corrosion of magnesium alloy AM50 in deicing salt solutions during "cathodic protection". " *Corrosion* 73.5 (2017): 563–582. DOI:10.5006/2301.
7. Barchiche, C., C. Deslouis, O. Gil, S. Joiret, P. Refait, and B. Tribollet. "Role of sulphate ions on the formation of calcareous deposits on steel in artificial seawater; the formation of green rust compounds during cathodic protection." *Electrochimica Acta* 54.13 (2009): 3580–3588. DOI: 10.1016/j.electacta.2009.01.023.
8. Zhang Yuping, and Richard A. Dawe. "Influence of Mg^{2+} on the kinetics of calcite precipitation and calcite crystal morphology." *Chemical Geology* 163.1-4 (2000): 129–138. DOI: 10.1016/S0009-2541(99)00097-2.
9. Eashwar, M., P. Sathish Kumara, R. Ravishankarb, and G. Subramaniand. "Sunlight-enhanced calcareous deposition on cathodic stainless steel in natural seawater." *Biofouling* 29.2 (2013): 185–193. DOI: 10.1016/S0009-2541(99)00097-2.
10. Möller, H. "The influence of Mg^{2+} on the formation of calcareous deposits on a freely corroding low carbon steel in seawater." *Corrosion Science* 49.4 (2007): 1992–2001. DOI: 10.1016/j.corsci.2006.10.011.
11. Okstad, T., Ø. Rannestad, R. Johnsen, and K. Nisancioglu. "Significance of Hydrogen Evolution during Cathodic Protection of Carbon Steel in Seawater." *Corrosion* 63.9 (2007): 857–865. DOI: 10.5006/1.3278436.
12. Li, Chengjie, Min Du, and Rongjie Gao. "Influence of dissolved oxygen on the protectiveness and morphological characteristics of calcareous deposits with galvanostatic polarization." *Journal of Ocean University of China* 16.2 (2017): 243–248. DOI: 10.1007/s11802-017-2933-4.
13. Refait, Ph., M. Jeannin, R. Sabot, H. Antony, and S. Pineau. "Electrochemical formation and transformation of corrosion products on carbon steel under cathodic protection in seawater." *Corrosion Science* 71 (2013): 32–36. DOI: 10.1016/j.corsci.2013.01.042.
14. Liu, F. G., S. R. Wu, and C. S. Lu. "Characterisation of calcareous deposits on freely corroding low carbon steel in artificial sea water." *Corrosion Engineering, Science and Technology* 46.5 (2011): 611–617. DOI: 10.1179/147842210X12754747500487.
15. Akamine, Kenichi, and Isamu Kashiki. "Corrosion Protection of Steel by Calcareous Electrodeposition in Seawater (Part 2)." *Zairyo-to-Kankyo* 52.8 (2003): 401–407. DOI: 10.3323/jcorr1991.52.401.
16. Laoun, Brahim, Karima Niboucha, and Lazhar Serir. "Cathodic protection of a buried pipeline by solar energy." *Revue des Energies Renouvelables* 12.1 (2008): 99–104.
17. Yalçın, Hayri, and Timur Koç. "Solar power for cathodic protection of steel pipeline." *Solar energy* 51.5 (1993): 415–418. DOI: 10.1016/0038-092X(93)90155-H.
18. Mishra, P. R., J. C. Joshi, and B. Roy. "Design of a solar photovoltaic-powered mini cathodic protection system." *Solar energy materials and solar cells* 61.4 (2000): 383–391. DOI: 10.1016/S0927-0248(99)00121-X.
19. El Ghitani, H., and A. H. Shousha. "Microprocessor-based cathodic protection system using photovoltaic energy." *Applied energy* 52.2-3 (1995): 299–305. DOI: 10.1016/0306-2619(95)00033-O.
20. Tian, Tian, and Shiwu Xiao. "Electrochemical Anti-corrosion System of Iron Tower Based on Solar Power Supply." *MATEC Web of Conferences*. Vol. 160. EDP Sciences, 2018. DOI: 10.1051/mateconf/201816003006.
21. Chernov, B.B., I.A. Chaves, A.M. Nugmanov, and R.E. Melchers. "Corrosion performance of low alloy steels in sub-Arctic natural seawater." *Corrosion* 74.12 (2018): 1466–1475. DOI: 10.5006/2951.

22. VSN 39–84. *Katodnaya zashchita ot korrozii oborudovaniya i metallicheskih konstruksii gidrotekhnicheskikh sooruzhenii*. L: VNIIG im. B.E. Vedeneeva, 1985.

23. Nugmanov, A.M., G.P. Shchetinina, and B.B. Chernov. “Izucheniye nachal’nykh stadiy protsessov korrozii stali v razlichnykh mestakh amurskogo zaliva.” *Vestnik Morskogo gosudarstvennogo universiteta im. adm. G.I. Nevel’skogo. Seriya «Teoriya i praktika zashchity morya»* 55 (2012): 30–35.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Ву Ван-Мынг — аспирант
Научный руководитель:
Чернов Борис Борисович
Морской Государственный университет
им. адм. Г. И. Невельского
690003, Российская Федерация, Владивосток,
ул. Верхнепортовая, 50а
Вьетнамский морской университет
180000, Вьетнам, г. Хайфон, ул. Лаччау, 484
e-mail: vumungmtb@gmail.com
Чернов Борис Борисович —
доктор химических наук, профессор
Морской Государственный университет
им. адм. Г. И. Невельского
690003, Российская Федерация, Владивосток,
ул. Верхнепортовая, 50А
e-mail: chernov@msun.ru
Нугманов Анас Масхарович —
научный сотрудник
Морской Государственный университет
им. адм. Г. И. Невельского
690003, Российская Федерация, Владивосток,
ул. Верхнепортовая, 50а
e-mail: alexnugmanov@mail.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Vu, Van-Mung — Postgraduate
Supervisor:
Chernov, Boris B.
Maritime State University named
after adm. G.I. Nevelskoy
50a Verkhneportovaya Str., Vladivostok, 690059,
Russian Federation
Vietnam Maritime University
484 Lach Tray Str., Haiphong, 180000, Vietnam
e-mail: vumungmtb@gmail.com
Chernov, Boris B. —
Dr. of Chemical Sciences, professor
Maritime State University named
after adm. G.I. Nevelskoy
50a Verkhneportovaya Str., Vladivostok, 690059,
Russian Federation
e-mail: chernov@msun.ru
Nugmanov, Anas M. —
Researcher
Maritime State University named
after adm. G.I. Nevelskoy
50a Verkhneportovaya Str., Vladivostok, 690059,
Russian Federation
e-mail: alexnugmanov@mail.ru

Статья поступила в редакцию 7 октября 2019 г.

Received: October 7, 2019.

THE IMPACT OF REGION NATURE ON WIND TURBINE POWER PRODUCTION**S. N. Mahmood¹, O. J. Abdalgar², E. V. Solomin²**¹ — Al-Kitab University, Kirkuk, Iraq² — South Ural State University, Chelyabinsk, Russian Federation

In the context of climate change, the implementation of renewable energy sources is becoming not only a trend, but also a necessity. The expansion of human habitat especially along waterways leads to the installation of long power lines, often vulnerable to accidents and vandalism. Energy complexes based on renewable energy sources can serve as an alternative. The behavior and the cost of a renewable power system that includes wind turbine module can be affected by the nature of system establishment location. In particular the air flows along the rivers could greatly increase the power generation of wind turbines installed on the river banks. In addition to that navigable rivers should be equipped with navigation equipment (buoys, differential stations, etc.) which could be powered from the local renewable based power stations. This research work concentrates mainly on studying the impact of surface nature on the behavior and the cost of a hybrid power station of solar system and wind turbine module. However, the hybrid power station is dominated significantly by wind turbine module. Three different critical surfaces in Amarah city - Iraq with respect to their anemometer height variations are studied. The proposed surfaces that have natural impairments are chosen to be in few trees, forests (woodlands), and city center (tall building) regions. The simulation results based on Homer software have shown that the performance and the design cost of the system in city center (tall building) region is the best. Finally, the proposed hybrid system inspires future extension for more investment projects due to the awful excess power generated.

Keywords: Surfaces Roughness, Wind Power Stations, Hybrid Power System Evaluation, HOMER Software.

For citation:

Mahmood, Sarmad Nozad, Omer Jamal Abdalgabar, and Evgenii V. Solomin. "The impact of region nature on wind turbine power production." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admiral S. O. Makarova* 11.6 (2019): 1152–1163. DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-6-1152-1163.

УДК 621.548**ВЛИЯНИЕ ПРИРОДЫ РЕГИОНА
НА ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТЬ ВЕТРОЭНЕРГЕТИКИ****С. Н. Махмууд¹, О. Д. Абдалгбар², Е. В. Соломин²**¹ — Университет Ал-Китаб, Киркук, Ирак² — Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Российская Федерация

Отмечается, что в условиях изменения климата внедрение возобновляемых источников энергии становится не только трендом, но и необходимостью. Расширение ареала человека особенно вдоль водных артерий приводит к установке протяженных линий электропередач, зачастую уязвимых для аварий и вандализма. Альтернативой могут служить энергокомплексы на основе возобновляемых источников энергии. Параметры и стоимость системы на основе возобновляемых источников энергии, включающей в себя ветроэнергетический модуль, могут быть в значительной степени обусловлены местными особенностями ландшафта. В частности, воздушные потоки вдоль пойм рек могут существенно повысить уровень генерации электроэнергии ветроэнергетическими установками, расположенными на берегу реки. Более того, судоходные реки должны быть оснащены навигационным оборудованием (буи, дифференциальные станции и т.д.), электроснабжение которых может осуществляться за счет электростанций на основе возобновляемых источников. Представленная исследовательская работа сосредоточена главным образом на изучении влияния природы поверхности на производительность и стоимость гибридной ветро-солнечной электростанции с преобладанием в структуре станции ветроэнергетического модуля. Изучены три различные критические поверхности в городе Амара (Ирак) с измерением скорости ветра на различных высотах. За основу исследований взяты поверхности, имеющие естественные препятствия и находящиеся в лесных массивах и в центре города с высотными зданиями. Результаты моделирования на основе

программного обеспечения *Homer* показывают, что производительность и стоимость проектирования системы в регионе с высотными зданиями являются наиболее оптимальными. Предлагаемая гибридная система имеет перспективы дальнейшего изучения и внедрения с целью организации инвестиционных проектов в связи с высоким прогнозируемым уровнем генерируемой энергии.

Ключевые слова: шероховатость поверхностей, ветроэлектростанция, оценка гибридных энергосистем, программное обеспечение *HOMER*.

Для цитирования:

Махмууд С. Н. Влияние природы региона на производительность ветроэнергетики / С. Н. Махмууд, О. Д. Абдалгбар, Е. В. Соломин // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2019. — Т. 11. — № 6. — С. 1152–1163. DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-6-1152-1163.

Introduction

The impression of power production based on renewable energy systems has recently fascinated the world due to the great role that is played by such systems to struggle the ultimate change of the climate conditions and to decrease the endless risks of the modern machineries. Apparently, the influence of wind turbine models to produce sustainable power systems might be sensible and clear nowadays particularly in the highlands and mountain terrains. In addition to that due to the air flows along the rivers, the banks not suitable for living but with open terrain, could be used for installation of wind turbines, solar power stations and other electric supply equipment, which could power the local navigation equipment, etc. It is worth mentioning that the generated power based on wind turbine models can be increased eight times with doubled speed depending on the cubic function to measure wind effectiveness. To be more precise, the average wind speed of 8 m/s in some specific places can generate power around (75 – 100) % greater than other places with lesser wind speed average. The annual information of the wind speed was given based on Amarah city – Iraq in 2014 – 2015. Moreover, wind speed data is collected form Weather Underground Organization (WUO) [1, 2] at station elevation with respect to wind speed results that assigned as wind resource input in Homer based measured and Weibull monthly and annually estimation of wind speed average [3]. The Tigris river is crossing the city, represents the clear place without obstacles, could be used both for installation of wind turbines and solar power stations. Since the water transportation requires lots of electric powered navigation equipment, the generation level could be further increased and successfully used for the reduction of power consumption, at the same time improving the quality of water transport navigation. In particular the team of authors had invented the small 3 kW wind turbine based on the river buoy, presented in Fig. 1.



Fig. 1. Small 3 kW buoy based vertical axis wind turbine developed by the author team

Undoubtedly, the wind energy is one of the cleanest forms of producing power from a renewable source. However, such systems are not that easy to be installed without effecting on the efficiency of the module. Hereby, there exist four major factors effect considerably on the efficiency of wind turbine units. These factors are identified as follows:

A. Wind Power

The power of the wind blowing in specific location effects considerably on the amount of realized power such that faster wind speed and stronger wind force generate greater amount of power produced by a wind turbine [4, 5].

As an equation, the whole mater can be expressed as follows:

$$P = kVF$$

Where P — represents the power of the wind; V — is the wind speed; F — is the wind force, and k — is constant.

It is worth mentioning that each region has its own wind speed. Hence, it is necessary to understand the relationship between wind speed and the amount of the realized power correspondingly.

B. Altitudes and Obstacles

The wind speed in the higher locations is considered considerably faster due to the numerous atmospheric factors [5]. In addition, these locations have fewer obstacles from the adjacent hills, trees, and higher buildings. It can be stated that around 12 % wind speed elevation will be realized as the distance between the ground level and the turbine extended to be doubled [1].

The speed of the wind is slowed by trees, buildings, hills, and mountains, which all create a certain form of friction that limits the blowing of the air. In order to ensure the continuity of a project, a wise decision is measuring the speed of the wind in the proposed site minimally for one year.

C. Air Temperature

The temperature of the wind plays a prominent role in dominating the efficiency of the generated power from wind turbine module [6]. It can be stated that the power from a wind turbine can be increased about 16% as the temperature decreased around the range (+20°C) – (-20°C) for any given wind speed.

D. Blade Aerodynamics

The maximum power efficiency based on wind turbine modules, depends mainly on the shape of the blades chosen to establish a wind power source. Hereby, the nature of the blades should be accurately taken into consideration. In addition, the amount of the lift for a specific airfoil depends considerably on the direction of the wind that generates the angle of the wind blowing up. This means, that as long as the angle is chosen to be larger, the intensity of the disturbance increases leading the lift to be vanished.

As a final point, a comparison based on standalone vs grid extension system was done using HOMER software [7] in this paper to reveal the cheapest design with respect to break-even distance as the example illustrated in [8].

Homer Software

Homer is one of the best power optimization programs due to wide usability and demand all around the universe. The program is identified and developed through Mistaya engineering specialized for the employ and implementation of national renewable energy laboratory (NREL) in USA. This organization fascinates the difficulties regarding appreciation issues for the design of grid connected and renewable solar systems based on different components [9]. The decision simplifications of HOMER fascinated the designer due to the harsh conditions that energy and solar system were known due to the variation of the cost and the high technological prosperity nowadays appeared [10].

The Aim of Work

This research work concentrates only on the factor in section (B). The paper aims to demonstrate the impact of wind turbine height variation difficulties based on surface roughness lengths on the performance and cost of renewable power systems in HOMER software with respect to certain location and anemometer height.

Surface roughness is the term given to the critical locations that suffer from natural impairments such as blown sea, lawn grass areas, snow surface, heavy trees areas, city center that contains tall buildings [7], etc. which all dominate the power production of wind turbine units. It is worth mentioning that three surfaces natures are taken into account to prove the offered challenge, identified as shown in Table 1.

Table 1

The Chosen Surface Roughness

Surface Roughness	Lengths, m
Few trees	0,1
Forests and woodlands	0,5
City center and Tall buildings	3,0

The information shown in Table 1 is given by Homer software such that each surface roughness is linked with wind turbine hub height is suitable for the nature of the region.

Proposed System Argument

In this paper, the tendency is to feed a certain load input specified by 1.1 kW by sufficient power. Most of power units generate higher energy depending on hybrid or individual modules such as PVs, hydro turbines, wind turbines, and the other subcomponents identified by batteries, converters, and generators. In this work, it is proposed to generate electricity using hybrid module constructed of PV panel and Wind turbine in order to provide the identified load by the required energy. The power system is established at Amarah city with respect to anemometer heights above ground level. It is worth mentioning that the data of the proposed location is given based on measured and Weibull estimated parameters. To be more specific, the coordination of the proposed location is given with respect to the attitude and longitude as 31.83° N, 47.17° E [1].

Wind Resources Based Amarah City

The geographical impairments of Amarah city lead the anemometer height to be risen up to specific meters above ground level [1], [2] with respect to measured and Weibull estimated parameters in order to reach the desired wind resources that shown in Fig.2. The information bar confirms that the maximum wind speed can be realized in June and hence the maximum power production will be assigned in the same period accordingly. Measurements of wind speed on the banks of Tigris river are appr. 18 % higher than on the other terrains due to the extra air flows generated by the difference of pressures. However it should be analysed as a separate topic for locally installed power based on renewables.

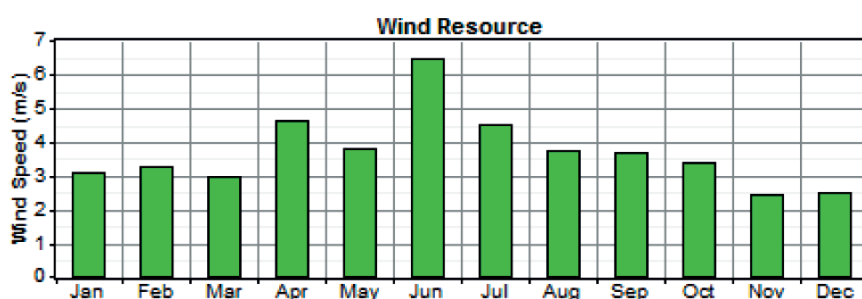


Fig. 2. Wind speed information of Amarah city

Load Setup Process

The load input is chosen to be specified by 1.1 kW – 11 kWh/d and assigned as a virtual residential load type with power consumption of 24 hours as shown in Table 2.

Table 2

Primary load power requirements

Hour	Load, kW	Hour	Load, kW
00:00 – 01:00	0.200	12:00 – 13:00	0.600
01:00 – 02:00	0.200	13:00 – 14:00	0.600
02:00 – 03:00	0.200	14:00 – 15:00	0.600
03:00 – 04:00	0.200	15:00 – 16:00	0.600
04:00 – 05:00	0.300	16:00 – 17:00	0.550
05:00 – 06:00	0.300	17:00 – 18:00	0.550
06:00 – 07:00	0.400	18:00 – 19:00	0.550
07:00 – 08:00	0.500	19:00 – 20:00	0.550
08:00 – 09:00	0.500	20:00 – 21:00	0.500
09:00 – 10:00	0.500	21:00 – 22:00	0.450
10:00 – 11:00	0.550	22:00 – 23:00	0.400
11:00 – 12:00	0.550	23:00 – 00:00	0.300

Power System Establishment

The hybrid system module that is employed to confirm the aim and the challenge of this work is constructed of several components specified by:

- 1) photovoltaic panel (PV);
- 2) converter;
- 3) hoppecke H300 Battery;
- 4) PGE 20/25 Wind turbine module.

For more clarity, it is intended to unveil the connection scheme of the proposed power system modules in Homer software as shown in Fig. 3.

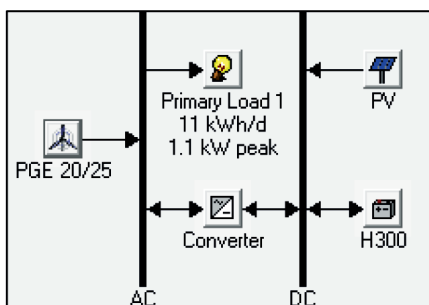


Fig. 3. Hybrid system module

1. Pv Module

Photovoltaic panel PV is the module that is employed to convert the incident sun light falling over the panel into electricity depending on the semiconductor materials that exist in the panel. In this research work, the size of the panel is specified by 2 kW since the load input is chosen to be around 1.1 kW peak. This means, the chosen PV size is extremely sufficient to provide the load by the required power. The cost items of the proposed PV panel are given as shown in Table 3, for lifetime of 25 years.

Table 3

Photovoltaic panel cost items

Size (kW)	Capital (\$)	Replacement (\$)	O&M (\$ / year)
2.00	1400	1350	50

The average sun radiation in the proposed town [11], [12] is assigned as Homer input and specified as given in Table 4.

Table 4

Average sun radiation in the proposed city

Month	Clearness index	Daily radiation (kWh/m ² /d)
January	0.546	2.78
February	0.572	3.66
March	0.597	4.90
April	0.622	6.19
May	0.654	7.26
June	0.664	7.66
July	0.667	7.53
August	0.670	6.93
September	0.698	6.13
October	0.637	4.41
November	0.593	3.18
December	0.531	2.48

2. The Converter

The converter is the module that converts the generated DC voltage by the PV into stable AC voltage in order to feed the primary load with the required power. Similarly, the size of the converter is specified in Homer by 2 kW to be compatible with the proposed load input. Moreover, the cost items of the proposed converter for lifetime of 15 years are given as shown in Table 5.

Table 5

Converter cost items

Size, kW	Capital, \$	Replacement, \$	O&M, \$ / year
2.00	1000	950	50

1. Hoppecke H300 Battery.

These kinds of batteries are made of lead acid compound that are suitable for such energetic systems. The nominal specification of H300 battery module is specified by 2V, 300 Ah, 0.6 kWh [7]. Besides, the cost items of the battery for lifetime of 4 years are given as shown in Table 6.

Table 6

H300 battery cost items

Quantity	Capital, \$	Replacement, \$	O&M, \$ / year
1	181	160	8

It is worth mentioning that Ampere hour term(Ah) that is usually appeared on the batteries is the amount of energy charges in a battery that allow one ampere of current to flow in one hour [10]. Hereby, Fig.4 satisfies this fact based on H300 battery module.

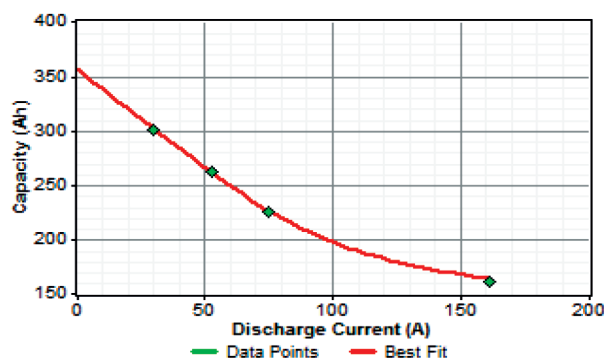


Fig. 4. Discharge curve of H300 battery module

2. PGE 20/25 Wind Turbine.

The proposed wind turbine is denoted as PGE 20/25, and specified by rotor diameter of 20m, 305 swept, 32 rpm, hub height of 25m and rated power of 25kW at 9m/s [7]. PGE 25, yields power around 25kW, this means that the generated power is extremely sufficient to feed the load input with the required power. The power curve regarding PGE 25 is unveiled intentionally as shown in Fig.5.

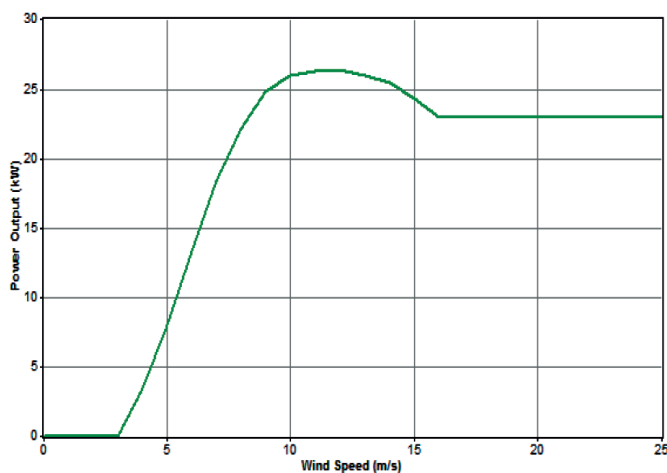


Fig. 5. Power curve of PGE 25

The quantity and cost items for PGE25 turbine are chosen for lifetime of 25 years [13] as shown in Table 7.

Table 7

PGE 20-25 wind turbine costs items

Quantity	Capital (\$)	Replacement (\$)	O&M (\$/yr)
1	20000	16000	1000

Performance And Cost Evaluation

The proposed hybrid power station produces sufficient power required to feed the load effectively depending on both PV and wind turbine module in percentage. As mentioned before, that the aim of this work is to study the effect of the difficulties that might be encountered where the wind turbine is equipped in certain surfaces. Hereby, THREE surface impairments at Amarah city were studied in order to show the impact of the roughness on the performance and the cost of a power system as exposed in Table 8 & 9.

Table 8

Performance results

Surface Type	Wind Power	Solar Power	Total Power	Excess Electricity
	kWh / year			
Few trees	63.186	6.610	69.796	65.621
Forests	76.452	4.957	81.409	77.267
City center	127.441	3.305	130.746	126.718

Table 9

Cost results

Surface Type	Initial capital (\$)	Operating Cost (\$/year)	Total NPC (\$)	COE (\$/kWh)
Few trees	26.558	1.766	49.140	0.984
Forests	25.858	1.734	48.028	0.962
City center	24.072	1.664	45.084	0.903

For more confirmation, it is intended to demonstrate the monthly average electric production with respect to the proposed surface types as shown in Fig. 6–8.

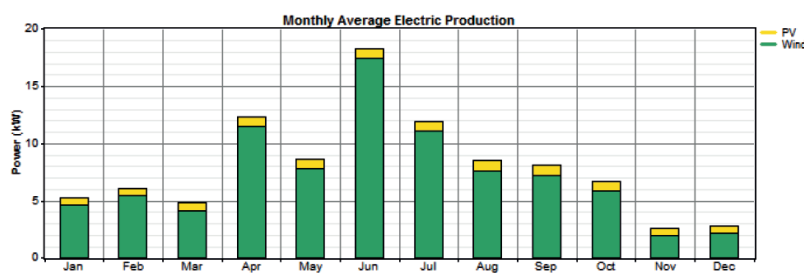


Fig. 6. Electric production in (Few trees) site

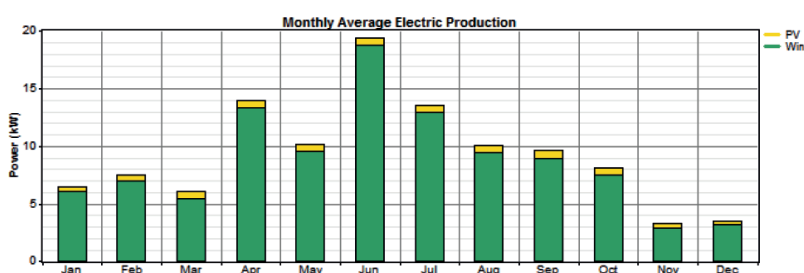


Fig. 7. Electric production in (Forests) site

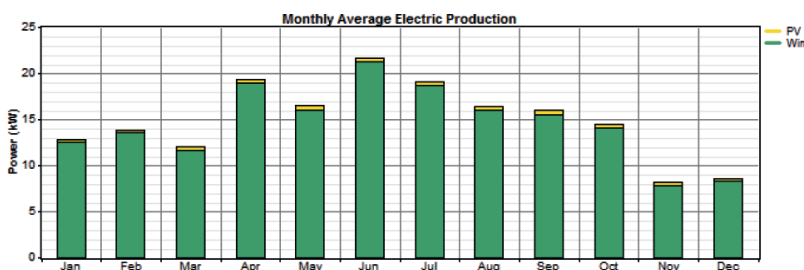


Fig. 8. Electric production in (City center) site

The three Figures 6–8 obey the performance results given in Table 8, and show the electric production of hybrid power station based on both solar and wind turbine systems in different percentages, with respect to wind turbine height variations identified in Table 1.

Moreover, the part that should pay attention is Table 10, which exhibits the excess electricity produced in each case study with respect to the height variations of the chosen surface roughness. The excess electricity results inspire future extensions for more investment projects.

Table 10

Excess electricity production

Surface Type	Lengths (m)	Excess Electricity (%)
Few trees	0.1	94
Forests	0.5	94.9
City center	3.0	96.6

Comparison With Grid Extension

The result of the comparison that was performed based on stand-alone vs grid extension demonstrates the minimum break-even distance with respect to extension inputs specified by the capital

cost of 8000 \$/km, operating and maintenance O&M of 160 \$/year, and grid power price of 0.4 \$/kWh . For more clarity, the result of the comparison over height variations is listed and demonstrated in Table 11.

Table 11

Stand-alone Vs Grid extension results

Surface Type	Lengths (m)	Grid extension distance (Km)
Few trees	0.1	2.90
Forests	0.5	2.79
City center	3.0	2.50

The breakeven grid extension distance means the minimum realized distance that makes the stand-alone system considered always economically inexpensive comparing with grid extension.

The results shown in curve Figures (9, 10 and 11) confirm that the stand-alone module proposed in each surface types in this work are considered better and cheaper than extending the grid, since the distance from the proposed location to the main power station at Amarah city is greater than the maximum distance in Table 11.

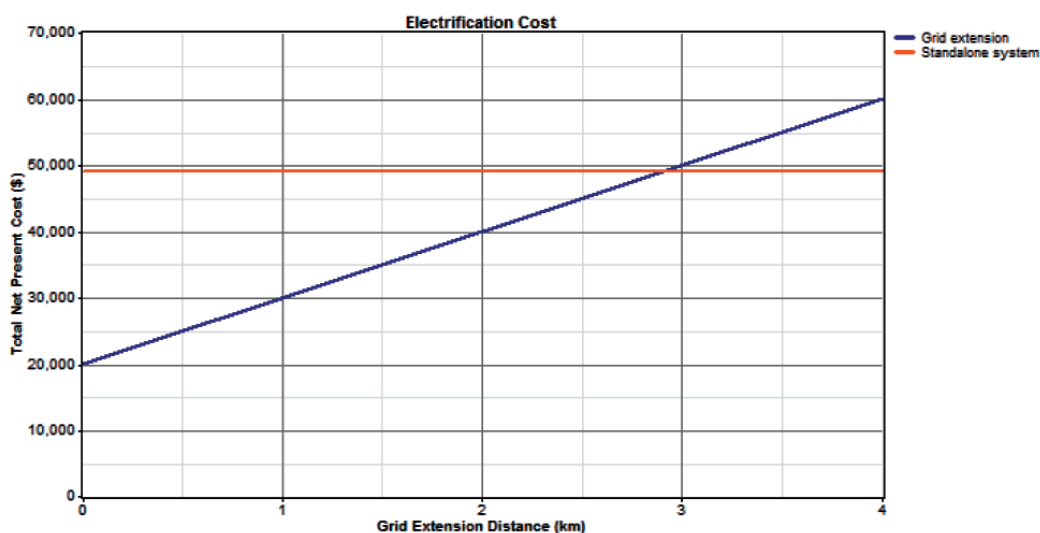


Fig. 9. Breakeven grid extension (Few trees)

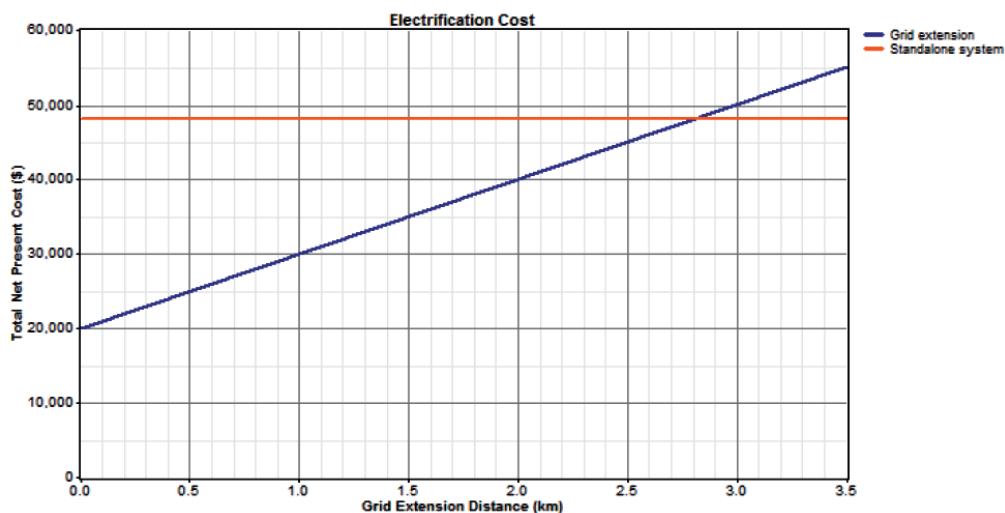


Fig. 10. Breakeven grid extension (Forests)

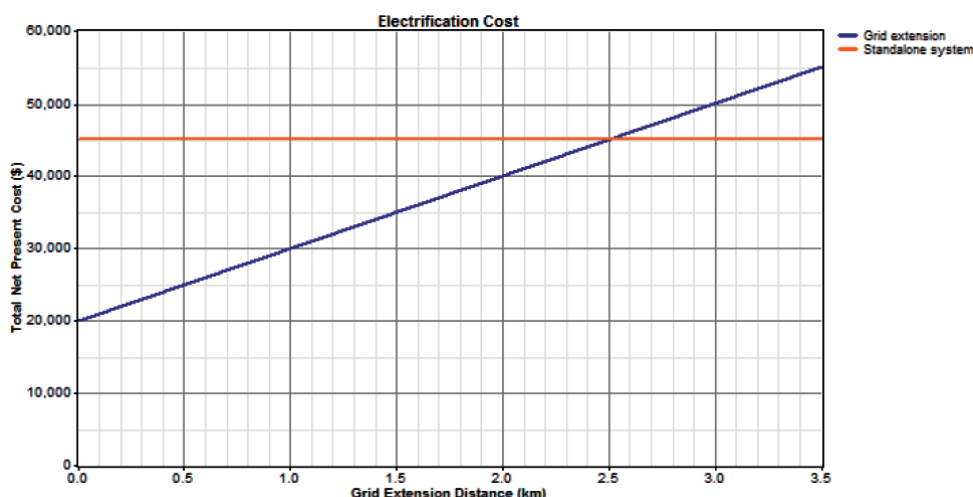


Fig. 11. Breakeven grid extension (City center)

Finally, it is intended to uniform the optimum results of the performance and cost with respect to height variations of the surface roughness in Table 12, in order to simplify the direct awareness while reviewing the results.

Table 12

Optimum performance and cost results

Surface Type	Performance results			
City Center & Tall Buildings	Wind Power	Solar Power	Total Power	Excess Electricity
	kWh / year			
	127.441	3.305	130.746	126.718
	Cost results			
	Initial capital, \$	Operating Cost, \$/year	Total NPC, \$	COE, \$/kWh
	24.072	1.664	45.084	0.903

Conclusions

The paper shows the impact of certain regions on the power systems that basically depend on the wind turbines to generate electric energy. In this work, three different wind turbine height variations based on surface roughness lengths were studied in Homer software to show the impact of these difficulties on the performance and the cost of hybrid power systems. For more clarity, it is intended to list the realized results as follows:

1. A unique hybrid power station is designed to provide a virtual residential load with required power.
2. The comparison operation based on stand-alone vs grid extension proved that the proposed stand-alone system is always better and cheaper than extending power from the grid.
3. The wind turbine located on the river bank, may increase power generation at least 18%.
4. The best performance and cost results were realized in city center case study, since the produced power is higher and the cost is lower.
5. The hub altitude of the wind turbine in the city center is chosen to be higher than other proposed locations in order to get rid of the obstacles that might be encountered. Hereby, the best power produced is obtained in city center case study.
6. As an investment, the established module achieves excess power production, which can be used to cover and feed larger rural or civil areas. Special attention should be paid to the clear water pools such as rivers, sea shores, etc.

7. Finally, it can be stated that the behavior of a power system in various specific locations regarding the performance and the design cost is significantly illustrious and different than each other.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Rasham A.M. Analysis of wind speed data and annual energy potential at three locations in Iraq / A.M. Rasham // *Int J comp appl*. — 2016. — Vol. 137. — No. 11. — Pp. 5–16.
2. Weather Underground Organization [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://www.wunderground.com/global/stations/40680.html> (дата обращения: 15.09.2019).
3. Fyrippis I. Wind energy potential assessment in Naxos Island, Greece / I. Fyrippis, P. J. Axaopoulos, G. Panayiotou // *Applied Energy*. — 2010. — Vol. 87. — Is. 2. — Pp. 577–586. DOI: 10.1016/j.apenergy.2009.05.031
4. Mathew S. Wind energy: fundamentals, resource analysis and economics / S. Mathew. — Berlin: Springer, 2006. — 246 p. DOI: 10.1007/3-540-30906-3.
5. Patel M.R. Wind and solar power systems: design, analysis, and operation / M.R. Patel. — 2nd Edition. — CRC press, 2005. — 472 p.
6. Nelson V. Wind energy: renewable energy and the environment / V. Nelson. — 1st Edition. — CRC press, 2009. — 324 p.
7. Lambert T. HOMER® Energy Modeling Software. Computer software. December 27, 2007.
8. Algburi S. S. Design Hybrid Micropower System In Mistah Village Using Homer Model / S. S. Algburi // *International Journal of Advanced Research in Engineering and Technology (IJARET)*. — 2013. — Vol. 4. — Is. 5. — Pp. 218–230.
9. Nurunnabi M. Grid connected hybrid power system design using HOMER / M. Nurunnabi, N.K. Roy // 2015 International Conference on Advances in Electrical Engineering (ICAEE). — IEEE, 2015. — Pp. 18–21. DOI: 10.1109/ICAEE.2015.7506786.
10. Mahmood S. N. The battery characteristics impact on solar systems: Performance and cost / S. N. Mahmood, A. Abdulabbas, H. Easa, S. S. Algburi // 2017 International Conference on Current Research in Computer Science and Information Technology (ICCIT). — IEEE, 2017. — Pp. 151–156. DOI: 10.1109/CRCSIT.2017.7965551.
11. Kasaeian A. Simulation and Economic Optimization of Wind Turbines and Photovoltaic hybrid System with Storage Battery and Hydrogen Tank (case study the city of Yazd) / A. Kasaeian, A. Shamel, R. Alayi // *Journal of current research in science*. — 2015. — Vol. 3. — No. 5. — Pp. 105–113.
12. Devine M. Wind-diesel hybrid options for remote villages in Alaska / M. Devine, J. Manwell, E. I. Baring-Gould, B. Petrie // *Proceedings of the AWEA Annual Conference*. — 2004.
13. Al-Juboori S. Optimization investigation of a stand-alone hybrid energy system design in Kirkuk technical college / S. Al-Juboori, A. Mejbel, A. Mutlag // *Recent Advances in Educational Technologies*. — 2015. — Pp. 119–126.

REFERENCES

1. Rasham, Ali M. “Analysis of wind speed data and annual energy potential at three locations in Iraq.” *Int J comp appl* 137.11 (2016): 5–16.
2. Weather Underground Organization. Web. 15 Sept. 2019 <<https://www.wunderground.com/global/stations/40680.html>>.
3. Fyrippis, Ioannis, Petros J. Axaopoulos, and Gregoris Panayiotou. “Wind energy potential assessment in Naxos Island, Greece.” *Applied Energy* 87.2 (2010): 577–586. DOI: 10.1016/j.apenergy.2009.05.031
4. Mathew, Sathyajith. *Wind energy: fundamentals, resource analysis and economics*. Berlin: Springer, 2006. DOI: 10.1007/3-540-30906-3
5. Patel, Mukund R. *Wind and solar power systems: design, analysis, and operation*. 2nd edition. CRC press, 2005.
6. Nelson, Vaughn. *Wind Energy Renewable Energy and the Environment*. 1st Edition. CRC press, 2009.
7. Lambert, Tom. HOMER® Energy Modeling Software. Computer software. Last Modified: December 27, 2007.
8. Algburi, Sameer Saadoon. “Design Hybrid Micropower System In Mistah Village Using Homer Model.” *International Journal of Advanced Research in Engineering and Technology (IJARET)* 4.5 (2013): 218–230.
9. Nurunnabi, Md, and N. K. Roy. “Grid connected hybrid power system design using HOMER.” *2015 International Conference on Advances in Electrical Engineering (ICAEE)*. IEEE, 2015. 18–21. DOI: 10.1109/ICAEE.2015.7506786.

10. Mahmood, Sarmad Nozad, Ali Abdulabbas, Haider Easa, and Sameer Saadoon Algburi. "The battery characteristics impact on solar systems: Performance and cost." *2017 International Conference on Current Research in Computer Science and Information Technology (ICCIT)*. IEEE, 2017. 151–156. DOI: 10.1109/CRCSIT.2017.7965551.

11. Kasaeian, Alibakhsh, Ali Shamel, and Reza Alayi. "Simulation and Economic Optimization of Wind Turbines and Photovoltaic hybrid System with Storage Battery and Hydrogen Tank (case study the city of Yazd)." *Journal of current research in science* 3.5 (2015):105–113.

12. Devine, Mia, E. Ian Baring-Gould, and Brent Petrie. "Wind-diesel hybrid options for remote villages in Alaska." *Proceedings of the AWEA Annual Conference*. 2004.

13. Al-Juboori, Sameer, Amer Mejbel, and Ali Mutlag. "Optimization investigation of a stand-alone hybrid energy system design in Kirkuk technical college." *Recent Advances in Educational Technologies* (2015): 119–126.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Махмуд Сармад Нозад — аспирант

Научный руководитель:

Соломин Евгений Викторович

Университет Ал-Китаб

Киркук, Алтун Копрй, Ирак

e-mail: nii-uralmet@mail.ru

Абдалгбар Омер — аспирант

Научный руководитель:

Соломин Евгений Викторович

Южно-Уральский государственный университет

454080, Российская Федерация, Челябинск,

проспект Ленина, 76

e-mail: nii-uralmet@mail.ru

Соломин Евгений Викторович —

доктор технических наук, доцент

Южно-Уральский государственный университет

454080, Российская Федерация, Челябинск,

проспект Ленина, 76

e-mail: nii-uralmet@mail.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Mahmood, Sarmad Nozad — Postgraduate

Supervisor:

Solomin, Evgenii V.

Al-Kitab University

Altun Kupri, Iraq

e-mail: nii-uralmet@mail.ru

Abdalgabar, Omer Jamal — Postgraduate

Supervisor:

Solomin, Evgenii V.

South Ural State University

76 Lenina Av., Chelyabinsk, 454080,

Russian Federation

e-mail: nii-uralmet@mail.ru

Solomin, Evgeny —

Dr. of Technical Sciences, associate professor

South Ural State University

76 Lenina Av., Chelyabinsk, 454080,

Russian Federation

e-mail: nii-uralmet@mail.ru

Статья поступила в редакцию 26 октября 2019 г.

Received: October 26, 2019.

Научное периодическое издание

**Вестник Государственного университета морского
и речного флота имени адмирала С. О. Макарова**

Том 11. № 6

2019 год

Выпускающий редактор *Н. А. Карамзина*
Дизайн и верстка *М. Н. Евсюткина*

Подписано в печать с оригинал-макета 30.12.19. Формат 60×90/8
Гарнитура Times New Roman. Усл. печ. л. 24,5. Тираж 500 экз. Заказ № 552/19

Государственный университет морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова
198035, Санкт-Петербург, ул. Двинская, 5/7