

Морской



№3(99)
сентябрь
2026
ISSN 1812-3694

Вестник

Morskoy Vestnik

30 ЛЕТ **винета**
МАШИНОСТРОИТЕЛЬНОЕ
ПРЕДПРИЯТИЕ

СУДОВОЕ, НЕФТЕГАЗОВОЕ И ПРОМЫШЛЕННОЕ ОБОРУДОВАНИЕ

Российский разработчик
и производитель оборудования
для судостроения, нефтегазовой
отрасли и промышленности



УСТАНОВКА ДЛЯ ОЧИСТКИ НЕФТЕСОДЕРЖАЩИХ (ЛЬЯЛЬНЫХ) ВОД СЛВ

Предназначена для очистки
судовых льяльных вод
от нефтепродуктов в соответствии
с требованиями МЕРС.107(49)

Имеет одобрение Российского
морского регистра судоходства



WWW.VINETA.RU

Морской Вестник



№3(99)

сентябрь

2026

Morskoy Vestnik

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ И ИНФОРМАЦИОННО-АНАЛИТИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

Редакционный совет

Сопредседатели:

М.В. Александров, генеральный директор АО «ЦТСС»,
президент Ассоциации судостроителей СПб и ЛО

А.Л. Кашин, председатель совета директоров
АО «НПО Завод «Волна»

В.С. Никитин, президент Международного
и Российского НТО судостроителей
им. акад. А.Н. Крылова

Г.А. Турчин, ректор СПбГМУ

Члены совета:

А.А. Асланян, генеральный директор
АО «НПФ «Меридиан»

Н.М. Вихров, генеральный директор
АО «КСЗ»

В.Э. Гель, генеральный директор
АО «УК «Радиостандарт»

К.Г. Голубев, генеральный директор
АО «ЦМКБ «Алмаз»,
генеральный директор АО «Северное ПКБ»

К.В. Гольдибаев, генеральный директор АО «ПКБ «РИО»

В.А. Долгих, генеральный директор
АО «НТИ «Радиосвязь»

В.Ю. Дорофеев, генеральный директор
АО «СПМБМ «Малахит»

П.А. Зубков, генеральный директор ООО «МКС»

К.С. Ивасишин, генеральный директор АО «ПЗ АТС-Т»

С.Н. Ирютин, председатель
Санкт-Петербургского Морского Собрания

Г.А. Коржавин, научный руководитель
АО «Концерн «Гранит-Электрон»

Л.Г. Кузнецов, генеральный конструктор
АО «Компрессор»

С.В. Орлов, генеральный директор
АО «Концерн «НПО «Аврора»

П.В. Першин, генеральный директор
АО «СПО «Арктика»

Ю.А. Подалинский, генеральный директор
ООО «НПП «Энергетические системы»

Е.А. Рылов, генеральный директор
АО «НПО Завод «Волна»

М.С. Смаковский, директор
ЗАО «ЦНИИ СМ»

К.А. Смирнов, генеральный директор АО «МНС»

И.С. Суховинский, директор ООО «ВИНЕТА»

В.С. Татарский, генеральный директор АО «ЭРА»

С.Г. Филимонов, генеральный директор
АО «Концерн Морфлот»

О.В. Шаин, генеральный директор ООО «ДиЭлКом»

В.А. Шуваев, генеральный директор АО НВП «ПРОТЕК»

И.В. Щербаков, генеральный директор
ООО ПКБ «Петробалт»

СОДЕРЖАНИЕ

ПРОЕКТИРОВАНИЕ И КОНСТРУКЦИЯ СУДОВ

С.Ю. Афанасьева, А.Н. Суслов. Концепция перспективного морского
самоотвозного земснаряда для обеспечения его логистической эффективности ...7

В.В. Болтенков, В.А. Игнашов, В.С. Христенко. Техническое предложение
по созданию мобильного спуско-подъемного устройства для буксируемых
подводных аппаратов в контейнерном исполнении..... 13

Н.Ю. Часовников. Новые инструменты построения поверхности
корпуса судна каркасно-кинематическим методом 15

П.А. Зубков, О.В. Захарова. Аналитическая модель оценки условий
обитаемости экипажей и совершенствования эргономических характеристик
жилых и служебных помещений перспективных надводных кораблей 21

К 90-летию **И.Я. Баскакова** 25

ТЕХНОЛОГИЯ СУДОСТРОЕНИЯ, СУДОРЕМОНТА И ОРГАНИЗАЦИЯ СУДОСТРОИТЕЛЬНОГО ПРОИЗВОДСТВА

В.Ю. Лисин, А.В. Жевлаков. Оптимизация процесса сборки сварных
конструкций с применением соединений типа «шип-паз»..... 27

Д.О. Глазырина, Е.Н. Алексин, Л.В. Пукова, Г.В. Николаев. Разработка
методики автоматизированного формирования технологических маршрутов
для изделий машиностроительного производства 30

Д.Н. Семёнов, И.В. Кузнецов, Д.О. Гоглев. Алгоритм виброналадки
вентиляционных установок с дефектами, ограничивающими качество
балансировки 35

**И.В. Щербаков, А.В. Новиков, В.Е. Щербаков, Е.Н. Шелег, М.В. Василев-
ская, О.В. Юркина.** От чертежа к единой информационной
модели судна. Подготовка специалистов среднего звена для цифрового
судостроения..... 41

СУДОВЫЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ УСТАНОВКИ И ИХ ЭЛЕМЕНТЫ

А.В. Довличарова. Методика обоснования технико-экономических
характеристик легких высокооборотных дизельных двигателей
скоростных катеров ВМФ в условиях импортозамещения 46

С.В. Зайцев, М.М. Барсукова, А.В. Ковальчук, М.Ю. Подалинский.
Особенности создания высокоомощных литий-ионных аккумуляторов..... 50

А.В. Балакин, А.Н. Дядик, М.В. Ларионов, Д.С. Маловик. Определение
характеристик абсорбера системы очистки газа 55

Б.Ю. Семёнов. Автоматический эксплуатационный контроль направления
вектора поля в системах компенсации магнитных полей корабельных
корпусных конструкций 59

В.В. Куц, А.А. Халявкин, А.И. Мащенко, С.А. Шугаев, Д.Р. Зубков.
Разработка специальной оправки для ремонта дейдвудных подшипников 62

М.Н. Буров, В.А. Пономарев. Метод выбора схемы корабельной
энергетической установки на начальном этапе проектирования 68

И.С. Суховинский. Верный курс ООО «ВИНЕТА». От инженерной идеи
до предприятия полного цикла 74



ПРОЕКТИРОВАНИЕ И ТЕХНОЛОГИЯ ПРИБОРОСТРОЕНИЯ И РАДИОЭЛЕКТРОННОЙ АППАРАТУРЫ

А. А. Катанович, К. В. Гольдибаев, А. В. Сорокин, В. А. Цыванюк. Один из подходов прогнозирования времени отказа элементов корабельного автоматизированного комплекса связи ВМФ	79
Е. А. Рылов, А. В. Долгов, К. В. Яшин. Метрологический цифровой двойник как инструмент автоматизации контроля средств измерений в условиях серийного выпуска продукции	83
А. И. Назмиев. Роль промежуточных металлических слоев в управлении взаимной диффузией в системах Si–Al	85
Е. В. Демин, С. В. Дворников, Д. В. Васильева. Оценка затухания в составных радиолиниях морской подвижной радиосвязи	87
А. Ю. Степкин, В. О. Миротворский. Расширение частотного диапазона УКВ антенны К-674–11Б для надводных кораблей и радиоцентров	91
Ф. А. Бараковский. Моделирование процесса высокоскоростного электроосаждения	94

ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ И УПРАВЛЯЮЩИЕ СИСТЕМЫ

Л. С. Хабаров. Программный модуль обеспечения безопасного расхождения кораблей (судов) с целями в ЭНИС нового поколения на отечественной операционной системе Astra Linux	101
А. Е. Васильев, Д. Е. Голубева, Д. А. Знаменский, В. А. Карпенко, В. Д. Ковалев. Подсистема обнаружения объектов на водной поверхности для экспериментального маломерного автономного судна	103
В. Р. Долгомирова, Г. В. Черкаев, Ю. Ю. Злобина, А. И. Н. Мханна. Обоснование необходимости создания комплексной модели для прогнозирования разливов нефтепродуктов	105
В. В. Ровник. Методика и алгоритм классификации замечаний к сложным техническим системам для цифровизации испытаний с использованием элементов искусственного интеллекта	110

РАДИОЛОКАЦИЯ И РАДИОНАВИГАЦИЯ

О. Г. Мальцев. Различение истинных и ложных целей на основе их упорядочения по отличительному признаку	113
Е. К. Самаров, Я. Ю. Ионченкова. Использование береговой радиолокационной станции для измерения волнообразующих свойств морских судов	120

В МОРСКОМ СОБРАНИИ

С. Н. Ирютин, В. Н. Торба, С. А. Мозговой. Мероприятия Санкт-Петербургского Морского собрания, посвященные 330-летию создания регулярного Военно-морского флота России	125
---	-----

Главный редактор

Д. С. Глухов

Тел.: (812) 600 4586

Факс: (812) 600 4586

E-mail: morvest@gmail.com

www.morvest.ru

Редакционная коллегия

Г. Н. Антонов, д-р техн. наук, доцент

В. В. Барановский, д-р техн. наук, проф.

Е. И. Глушанков, д-р техн. наук, проф.

Е. А. Горин, д-р эконом. наук, проф.

С. В. Дворников, д-р техн. наук, проф.

В. Н. Илюхин, д-р техн. наук, проф.

Д. В. Казунин, д-р техн. наук

Р. Н. Караев, канд. техн. наук

В. В. Кобзев, д-р техн. наук, проф.

Ю. Н. Кормилицин, д-р техн. наук, проф.

П. А. Кротов, д-р истор. наук, проф.

Д. И. Кузнецов, д-р техн. наук, доцент

Д. В. Никущенко, д-р техн. наук

В. Н. Половинкин, д-р техн. наук, проф.

А. В. Пустошный, д-р техн. наук, проф., чл.-корр. РАН

А. А. Родионов, д-р техн. наук, проф.

К. В. Рождественский, д-р техн. наук, проф.

Н. В. Савищенко, д-р техн. наук, проф.

А. Б. Фомичёв, д-р техн. наук, проф.

В. И. Черненко, д-р техн. наук, проф.

С. Н. Шаров, д-р техн. наук, проф., член-корр. РАН

Редакция

Тел./факс: (812) 600 4586

E-mail: morvest@gmail.com

Редактор

Т. И. Ильичёва

Дизайн, верстка

С. А. Кириллов, В. Л. Колпакова

Адрес редакции

190068 Санкт-Петербург,

наб. реки Мойки, 84, пом. 13Н

Журнал зарегистрирован Министерством РФ по делам печати, телерадиовещания и средств массовых коммуникаций. Свидетельство о регистрации ПИ № 77-12047 от 11 марта 2002 г.

Учредитель-издатель

ООО Издательство «Мор Вест»,

190068, Санкт-Петербург,

наб. реки Мойки, 84, пом. 13Н

Электронная версия журнала

размещена на сайте ООО «Научная электронная библиотека» www.elibrary.ru и включена

в Российский индекс научного цитирования

Решением Президиума ВАК журнал «Морской вестник» включен в перечень ведущих научных журналов и изданий, выпускаемых в РФ, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени доктора и кандидата наук. www.perechen.vak2.ed.gov.ru

Подписка на журнал «Морской вестник»

(индекс ПМ 467) может быть оформлена по каталогу Почты России «Подписные издания» или непосредственно в редакции журнала через издательство «Мор Вест»

Отпечатано в ООО «Сфера»

Адрес типографии: 190005, Санкт-Петербург,

ул. Егорова, д. 26а, литер Б.

Тираж 300 экз. Заказ № 3447

Дата выхода в свет – 15.09.2026

Каталожная цена – 675,42 руб.

Ответственность за содержание информационных и рекламных материалов, а также за использование сведений, не подлежащих публикации в открытой печати, несут авторы и рекламодатели. Перепечатка допускается только с разрешения редакции

Морской Вестник

№ 3 (99)

September

2026

Morskoy Vestnik

SCIENTIFIC, ENGINEERING, INFORMATION AND ANALYTIC MAGAZINE

Editorial Council

Co-chairman:

M.V. Alexandrov, General Director JSC SSTC,
President of the Association

of Shipbuilders of St. Petersburg and Leningrad Region

A.L. Kashin, chairman of the board of directors

JSC NPO Zavod Volna

V.S. Nikitin,

President of the International

and Russian Scientific and Technical Association

of Shipbuilders named after Acad. A.N. Krylov

G.A. Turichin, Rector SPbSMTU

Council Members:

A.A. Aslanyan, General Director

JSC RPF Meridian

V.A. Dolgikh, General Director JSC NTI Radiosvyaz

V.Yu. Dorofeev, General Director

JSC SPMDB Malachite

S.G. Filimonov, General Director

JSC Concern Morflot

V.E. Gel, General Director JSC MC Radiostandart

K.V. Gol'dibaev, General Director JSC PKB RIO,

General Director JSC Severnoye Design Bureau

K.G. Golubev, General Director JSC Almaz CMDB,

General Director JSC Severnoye Design Bureau

S.N. Iryutin, Chairman

St. Petersburg Marine Assembly

K.S. Ivasishin, General Director JSC «PPATS – T»

G.A. Korzhavin, Scientific Director

JSC Concern Granit-Elektron

L.G. Kuznetsov, General Designer

JSC Compressor

S.V. Orlov, General Director JSC Concern SPA Avrora

P.V. Pershin, General Director JSC NPA ARKTIKA

Yu. A. Podalinsky, General Director

JSC Scientifically industrial enterprise «Power Systems»

E.A. Rylov, General Director JSC NPO Zavod Volna

M.S. Smakovsky, Director JSC CRIME

I.V. Scherbakov, General Director JSC PDB Petrobalt

O.V. Shain, General Director LLC DiElCom

V.A. Shuvaev, General Director JSC NVP «PROTEK»

K.A. Smirnov, General Directors JSC MNS

I.S. Sukhovinsky, Director JSC VINETA

V.S. Tatarsky, General Director JSC ERA

N.M. Vikhrov, General Director JSC KSZ

P.A. Zubkov, General Director MCS LLC

ABSTRACTS

SHIP DESIGN AND CONSTRUCTION

- S. Yu. Afanas'eva, A. N. Suslov.** Concept of a promising marine hopper dredger to ensure their logistical efficiency 7
- V. V. Boltenkov, V. A. Ignashov, V. S. Khristenko.** Technical proposal for the creation of a mobile launching and recovery device for towed submarines in a container design 13
- N. Yu Chasovnikov.** New Tools for constructing ship hull surfaces using the frame-kinematic method 15
- P. A. Zubkov, O. V. Zakharova.** An analytical model for assessing crew living conditions and improving the ergonomic characteristics of living and service spaces on prospective surface ships 21
- On the 90th anniversary of I. Ya. Baskakov 25

TECHNOLOGY OF SHIPBUILDING, SHIP REPAIR AND ORGANISATION OF SHIPBUILDING

- V. Yu. Lisin, A. V. Zhevolakov.** Optimization of the welding process using Tongue-and-Groove joints 27
- D. O. Glazyrina, E. N. Aleksin, L. V. Gukova, G. V. Nikolaev.** Development of a methodology for the automated generation of process routings for mechanical engineering products 30
- D. N. Semyonov, I. V. Kuznetsov, D. O. Goglev.** Algorithm for vibration adjustment of ventilation units with defects limiting balancing quality 35
- I. V. Shcherbakov, A. V. Novikov, V. E. Shcherbakov, E. N. Sheleg, M. V. Vasilevskaya, O. V. Yurkina.** From drawing to a unified vessel information model. Training mid-level specialists for digital shipbuilding 41

SHIP POWER PLANTS AND THEIR ELEMENTS

- A. V. Dovlicharova.** methodology for justifying the technical and economic characteristics of light high-speed diesel engines for navy high-speed boats in the context of import substitution 46
- S. V. Zaitsev, M. M. Barsukova, A. V. Koval'chuk, M. Yu. Podalinsky.** Features of the creation of high-power lithium-ion batteries 50
- A. V. Balakin, A. N. Dyadik, M. V. Larionov, D. S. Malovik.** Determining the characteristics of a gas purification system absorber 55
- B. Yu. Semyonov.** Automatic operational monitoring of the direction of the field vector in magnetic field compensation systems of ship hull structures 59
- V. V. Kuts, A. A. Khalyavkin, A. I. Mashchenko, S. A. Shugaev, D. R. Zubkov.** Development of a special mandrel for repairing stern tube bearings 62
- M. N. Burov, V. A. Ponomarev.** Method for selecting a marine propulsion plant layout at the initial design stage 68
- I. S. Sukhovinsky.** The right course of VINETA JSC. From an engineering idea to a full-cycle enterprise 74



DESIGN AND TECHNOLOGY OF INSTRUMENT MAKING AND RADIOELECTRONIC EQUIPMENT

- A.A. Katanovich, K. V. Gol'dibaev, A. V. Sorokin, V.A. Tsyvanyuk.** One of the approaches to predicting the failure time of elements of the naval automated Shipborne communications complex 79
- E.A. Rylov, A. V. Dolgov, K. V. Yashin.** Metrological digital twin as a tool for automating the control of measuring instruments in serial production conditions 83
- A. I. Nazmiev.** The role of intermediate metal layers in controlling interdiffusion in Si–Al systems 85
- E. V. Demin, S. V. Dvornikov, D. V. Vasil'eva.** Attenuation assessment in composite marine mobile radio links 87
- A. Yu. Stepkin, V. O. Mirotvorskyy.** Expanding the frequency range of the K-674–11B VHF antenna for surface ships and radio centers 91
- F.A. Barakovskiy.** Modeling of the high-speed electrodeposition process 94

INFORMATION-MEASURING AND MANAGEMENT SYSTEMS

- L. S. Khabarov.** Software module for ensuring safe ship (vessel) target alignment in a new-generation ENIS on the domestic astra linux operating system 101
- A. E. Vasil'ev, D. E. Golubeva, D. A. Znamensky, V. A. Karpenko, V. D. Kovalev.** Water surface object detection subsystem for an experimental small-size autonomous vessel 103
- V. R. Dolgomirova, G. V. Cherkaev, Yu. Yu. Zlobina, A. I. N. Mhanna.** Justification of the need to create a comprehensive model for forecasting oil product spills 105
- V. V. Rovnik.** Methodology and algorithm for classifying comments on complex technical systems for digitalization of tests using elements of artificial intelligence 110

RADAR AND RADIO NAVIGATION

- O. G. Mal'tsev.** Differentiation of true and false targets based on the their ranging on discriminating characteristic 113
- E. K. Samarov, Ya. Yu. Ionchenkova.** Application of a coastal radar station for measuring wave-forming properties of marine vessels 120

IN THE MARINE ASSEMBLY

- S. N. Iryutin, V. N. Torba, S. A. Mozgovoy.** Events of the St. Petersburg naval assembly dedicated to the 330th anniversary of the creation of the regular russian navy 125

Editor-in-Chief

D.S. Glukhov

Phone: (812) 600 4586

Fax: (812) 600 4586

E-mail: morvest@gmail.com

www.morvest.ru

Editorial Collegium

G.N. Antonov, D. Sc., docent

V.V. Baranovsky, D. Sc., Prof.

V.I. Chernenko, D. Sc., Prof.

S.V. Dvornikov, D. Sc., Prof.

A.B. Fomichyov, D. Sc., Prof.

E.I. Glushankov, D. Sc., Prof.

E.A. Gorin, D. Sc., Prof.

V.N. Ilyukhin, D. Sc., Prof.

D.V. Kazunin, D. Sc.

R.N. Karaev, Ph. D.

V.V. Kobzev, D. Sc., Prof.

Yu.N. Kormilitsin, D. Sc., Prof.

A.I. Korotkin, D. Sc., Prof.

P.A. Krotov, D. Sc., Prof.

D.I. Kuznetsov, D. Sc., docent

D.V. Nikushchenko, D. Sc.

of Rocket and Artillery of Sciences of Russia

V.N. Polovinkin, D. Sc., Prof.

A.V. Pustoshny, D. Sc., Prof., corresponding member

of the Academy of Sciences of Russia

A.A. Rodionov, D. Sc., Prof.

K.V. Rozhdestvensky, D. Sc., Prof.

N.V. Savishchenko, D. Sc., Prof.

S.N. Sharov, D. Sc., Prof., corresponding member of the

Academy of Rocket and Artillery of Sciences of Russia

Editorial staff

Phone/Fax (812) 600 4586

E-mail: morvest@gmail.com

Editor

T.I. Ilyichiova

Design, imposition

S.A. Kirillov, V.L. Kolpakova

Editorial office

office 13N, 84, Nab. r. Moyki, 190068, St. Petersburg

The magazine is registered by RF Ministry of Press,

TV and Radio Broadcasting and Means of Mass

Communications, Registration Certificate

ПИ № 77-12047 of 11 march 2002

Founder-Publisher

JSC Publishing House «Mor Vest»

office 13N, 84, Nab. r. Moyki, 190068, St. Petersburg

The magazine electronic version

is placed on the site LLC «Nauchnaya elektronnyaya

biblioteka» www.elibrary.ru and is also included to the

Russian index of scientific citing

By the decision of the Council of VAK the Morskoy

Vestnik magazine is entered on the list of the leading

scientific magazines and editions published in the

Russian Federation where basic scientific outcomes of

doctoral dissertations shall be published.

www.perechen.vak2.ed.gov.ru

You can **subscribe to the Morskoy Vestnik** magazine

using Russian Post Catalog «Subscription editions»

(subscription index ПИМ 467) or directly at the editor's

office via the Morvest Publishing House

Printed by Sfera JSC

Printing house address 190005, St. Petersburg,

Egorova st., 26a, letter B

Circulation 300. Order № 3447

Publication date – 15.09.2026

Catalog price – 675,42 rubles

Authors and advertisers are responsible for contents

of information and advertisement materials as well as for use

of information not liable to publication in open press.

Reprinting is allowed only with permission of the editorial staff

Морской транспорт играет важнейшую роль в обеспечении грузопотоков России, прежде всего внешних. В 2025 г. морским транспортом перевезено ок. 78% внешнеторговых грузов, а для арктических районов доля внешнеторговых перевозок морским транспортом приближается к 100% [1].

Увеличение грузопотоков, направленное на укрепление внешнеэкономического положения России, требует строительства новых и расширения существующих портов и терминалов, снижения времени ожидания погрузочно-разгрузочных операций, организации быстрого и безопасного подхода транспортных судов к портовой инфраструктуре. Одно из ключевых мест в этих процессах занимает дноуглубление: земснаряды участвуют в обеспечении достаточных глубин фарватеров и портовых акваторий, а также в формировании морских и береговых сооружений.

Капитальное дноуглубление подразумевает строительство фарватеров, портов, гидротехнических сооружений; *ремонтное* – поддержание требуемых глубин акваторий. Расширение портовой инфраструктуры влечет за собой увеличение ежегодных объемов ремонтного дноуглубления.

ТЕКУЩАЯ СИТУАЦИЯ

В 2020–2024 гг. объем дноуглубительных работ в акваториях России составил 75 млн. м³. Около 98% этого объема были выполнены компаниями так называемой большой четверки: Van Oord, Boskalis (обе – Нидерланды), Jan De Nul, Deme Group (обе – Бельгия). После ужесточения антироссийских санкций в 2022 г. эти компании ушли с рынка нашей страны. Возникла острая нехватка дноуглубительных мощностей, необходимых для реализации запланированных морских инфраструктурных проектов [2].

Таким образом, российская морская дноуглубительная отрасль требует проведения исследований в следующих основных областях:

- исследование моделей использования земснарядов различных типов при решении дноуглубительных задач;
- определение характеристик земснарядов различных типов и перечня их ключевого оборудования с учетом возможности его производства в России;
- унификация проектов перспективных земснарядов и поиск компромисса между требованиями различных заказчиков, акваторий и условий эксплуатации;
- эффективное планирование и согласование процесса проектирова-

КОНЦЕПЦИЯ ПЕРСПЕКТИВНОГО МОРСКОГО САОМОТВОЗНОГО ЗЕМСНАРЯДА ДЛЯ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ЕГО ЛОГИСТИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ

*С. Ю. Афанасьева, аспирант,
А. Н. Сулов, д-р техн. наук, проф.,
СПбГМТУ,
контакт. тел. +7 (911) 141 8758*

ния и строительства судна между всеми участниками процесса.

В качестве приоритетного типа земснаряда признается самоотвозный землесос. Среди его преимуществ: высокая автономность, хорошие мореходные характеристики и способность работать в открытых акваториях, экономическая эффективность. Объем трюма является ключевой характеристикой самоотвозного землесоса, на основе которой определяется производительность дноуглубительного и другого оборудования на борту.

Обеспечение технологического суверенитета в развитии российской портовой инфраструктуры требует создания отечественного дноуглубительного флота. Сегодня это как никогда актуально: с одной стороны, нарушены партнерские взаимоотношения с компаниями стран Запада и использование ранее доступных дноуглубительных мощностей невозможно, с другой – объемы грузопотоков продолжают увеличиваться в связи с укреплением связей со странами Востока, и дноуглубление здесь играет ключевую роль.

При этом основное внимание проектантов и заказчиков уделяется потребности в дноуглублении в арктических акваториях. Такой подход не способствует развитию транспортной системы и дноуглубления как единого комплекса. Модели эксплуатации земснарядов должны учитывать планы и тенденции развития морского транспортного комплекса в целом. Особое внимание следует уделять связности акваторий, а также эксплуатационным ограничениям, особенно свойственным замерзающим морям.

Исходя из этого, можно определить перспективные направления исследований, связанных с созданием отечественного дноуглубительного флота:

- создание единой связной системы, опирающейся на данные о текущей и перспективной потребности в дноуглублении, существующих и необходимых судах;
- разработка логистических моделей

оптимального перемещения земснарядов между морскими акваториями России, минимизирующими время их задержек и простоев и при этом максимизирующими топливную эффективность;

- создание моделей взаимодействия земснарядов и вспомогательных судов различных типов, учитывающих особенности дноуглубительных проектов и внешние условия;
- координация проектантов, судостроительных заводов, производителей судового комплектующего оборудования, судовладельцев, классификационного общества, научно-исследовательских организаций, строителей прибрежной инфраструктуры для своевременного планирования заказов на оборудование и унификации проектов.

Планы развития Северного морского пути (СМП) до 2035 г. [3] и его инфраструктуры [4] предполагают создание флотилии дноуглубительных судов для их использования в акваториях Севера в летне-осенний период и незамерзающих морях в зимне-весенний период. В связи с этим важное значение имеет возможность перенаправления земснарядов из одной акватории в другую, что особенно актуально для краткосрочных дноуглубительных работ (небольшие проекты по ремонтному и капитальному дноуглублению).

Различные организации в морской отрасли предлагают в качестве перспективных в основном два типоразмера объема трюма будущего судна – 4–6 и 8–12 тыс. м³.

С учетом этого для пополнения отечественного флота самоотвозных землесосов можно предложить два типоразмера:

- *малый землесос*, обладающий высокой мобильностью за счет возможности прохода внутренними водными путями (ВВП) между морскими районами. Это будет способствовать максимизации времени полезной работы, в том числе в замерзающих акваториях, а благода-

Объемы капитального дноуглубления для арктических проектов

Проект	Расположение	Статус проекта и объем дноуглубительных работ
Морской канал	Обская губа	Реализуемые проекты 4,4 млн. м³
Морской порт Сабетта	То же	
Терминал СПГ «Утренний»	“ “	
Нефтяной терминал «Порт бухта Север»	Енисейский залив	Проекты на стадии подготовки 28,6 млн. м³
Морские терминалы на базе Сырадасайского угольного месторождения	То же	
Морской терминал в порту Певек	мыс Наглейнын	
Развитие глубоководных терминалов еще в 8 портах СМП к 2040 г.		

ря малым размером, уменьшению стоимости и повышению скорости строительства, что особенно актуально для российского судостроения. Следовательно, реализация структурных дноуглубительных проектов будет возможна в сжатые сроки;

– *большой землесос*, объем трюма и характеристики оборудования которого позволят реализовывать дноуглубительные проекты федерального значения в перспективных акваториях, причем основанные на опыте и решениях, полученных в результате эксплуатации малого землесоса.

Задачи настоящей работы:

- проанализировать динамику использования морских бассейнов России с учетом изменения грузопотоков и потребности в дноуглублении;
- определить маршруты перемещения самоотвозного землесоса между морскими бассейнами России и существующие ограничения, сравнить протяженности этих маршрутов и затраты времени;
- оценить логистическую эффективность существующих и перспективных проектов самоотвозных землесосов,
- предложить новую концепцию малого самоотвозного землесоса, определить в первом приближении его основные характеристики с учетом мощностей российских судостроительных и машиностроительных предприятий.

МОРСКИЕ БАССЕЙНЫ РОССИИ: ГРУЗОБОРОТЫ

Арктический бассейн. Арктические акватории наименее развиты среди всех других акваторий нашей страны, но именно они имеют наибольший потенциал, что обусловлено рядом факторов как имевших место на протяжении многих лет, так и возникших на фоне обострения мировой политической обстановки:

1. Северный морской путь (СМП) – кратчайший морской маршрут между Европой и Азией. Развитие этого направления вновь выходит на первый план: этому способствует международный интерес к запуску трансарктической контейнерной линии [5], а также интеграция СМП в Трансарктический транспортный коридор – единую транспортную систему Арктики [6].

СМП – наиболее целесообразный путь вывоза углеводородов и других полезных ископаемых, добываемых в Арктической зоне. Помимо нефтегазовых проектов («Ямал СПГ», «Арктик СПГ 2»), развиваются и др. (Ба-

имский горно-обогатительный комбинат). При этом нефтегазовый кризис в Персидском заливе, связанный с войной США и Израиля против Ирана, может повысить значимость этих проектов в мировом масштабе.

Этот путь – не только короткий, но и безопасный из Европы в Азию. На фоне нестабильной военной обстановки в Персидском заливе, нападений на суда вблизи Аравийского полуострова Суэцкий канал становится менее безопасным, поэтому многие суда перенаправляются более длинным маршрутом вокруг Африки. Это увеличивает время в пути и эксплуатационные расходы, что повышает привлекательность СМП как альтернативного маршрута международных перевозок.

На фоне обострения политической обстановки СМП становится более привлекательным также для российских перевозчиков. В Балтийском море участились случаи задержания судов «теневых флотов» властями прибрежных государств; в Черном и Средиземном морях суда, связанные с Россией, подвергаются атакам безэкипажных катеров и диверсиям. В акваториях СМП такие угрозы отсутствуют.

Атаки на объекты портовой инфраструктуры в Балтийском и Черном морях влекут за собой колебания грузопотоков на этих направлениях. В свою очередь, развитие партнерских отношений с Китаем и странами Юго-Восточной Азии делают более привлекательными короткие и безопасные маршруты, связывающие европейскую часть нашей страны с Дальним Востоком.

Несмотря на это, в настоящее время СМП занимает не ключевое место в общем объеме морских грузооборотов. Наибольшая доля Арктического бассейна в суммарном морском грузообороте России была достигнута в 2019 г. – 12,5%, а с 2022 г. она непрерывно снижается: с 11,7% в 2022 г. до 9,8% в 2025 г. [7].

Увеличению грузооборота в этом регионе будет способствовать дно, в частности на подходах к портам (на-

пример, большой морской канал Сабетты). Объемы капитального дноуглубления для текущих и перспективных арктических проектов приведены в табл. 1 [2].

В связи с увеличением грузопотоков и расширением инфраструктуры будут возрастать и объемы ремонтных дноуглубительных работ. Их прогнозируемые объемы представлены ниже.

Прогнозируемые объемы ремонтного дноуглубления в акваториях СМП [9]

Год	Объем, млн. м ³
2026	3,93
2027	4,78
2028	5,09
2029	5,75
2030	5,79
Всего	25,49

Балтийский и Азово-Черноморский бассейны. В течение прошедших 10 лет объемы грузооборота в Балтийском и Азово-Черноморском бассейнах характеризуются близкими значениями – ок. 250–280 млн. т (после 2019 г.) и их долей в общем объеме грузооборотов России (ок. 30–31%) [7]. Исторически Азовское, Черное и Балтийское моря наиболее удобны для международной торговли благодаря их расположению в европейской, самой населенной, части России.

Однако в связи с обострением военной и политической обстановки (нападения на суда в Черном море, атаки на портовую инфраструктуру, а также давление санкций на энергетику) положение может измениться. Кроме того, как в Азовском и Черном, так и в Балтийском морях необходимо регулярное ремонтное дноуглубление, а в связи со строительством и расширением портов в последние 10 лет в обоих бассейнах были реализованы проекты, которые требовали капитального дноуглубления (Усть-Луга в Балтийском море и порты Темрюк и Кавказ в Азовском море) [9, 10].

Каспийский бассейн является наименьшим по грузообороту: в течение последних 10 лет его доля в общероссийском морском грузообороте находилась на уровне 1% [7]. При этом

Существующие и проектируемые российские землесосы

Характеристика	Значение							
Заказчик	ФГУП «Росморпорт»		ФГУП «Гидрографическое предприятие» (ГК «Росатом»)		ООО «Строительная дноуглубительная компания» (СДК)		н/д	
Проектант	Damen Shipyards Group		ЦМКБ «Алмаз»		н/д		ПКБ «Петробалт»	
Проект	TSHD 1000	TSHD 2000	05470	н/д	н/д		н/д	
Объем трюма, м³	1000	2000	4000	8000	5000	10 000	6000	11 000 – 12 000
Статус	Построены		Проект, 1-я очередь	Проект, 2-я очередь	Проект, 1-я очередь	Проект, 2-я очередь	Проект, 1-я очередь	Проект, 2-я очередь
Кол-во судов	3	3	н/д		2	1 или 2	н/д	
Длина, м	62,05	80,0	ок. 95	ок. 117	н/д	н/д	ок. 101,5	н/д
Ширина, м	14,29	16,49	17	21	≥ 17**	≥ 24**	ок. 22,5	≥ 24*
Водоизмещение полное, т	2920	5028	ок. 9200	ок. 17500	н/д	н/д	н/д	н/д
Ледовый класс	Ice1	Ice1	н/д	н/д	Ice2	н/д	Не выше Ice1	

* Сообщается, что с 2026–2027 гг. необходимы один самоотвозный землесос с объемом трюма 7–10 тыс. м³ и один землесос с объемом трюма 4–6 м³ наряду с еще 9 единицами дноуглубительного флота, однако информация о полном количестве требуемых судов на более длительную перспективу в открытом доступе отсутствует.

** Данные отсутствуют в открытом доступе и дополнены на основе статистической информации [24, 25].

судоходные акватории Каспийского моря требуют регулярного дноуглубления. Так, в 2025 г. объем ремонтного дноуглубления Волго-Каспийского морского судоходного канала составил 5,0 млн. м³, а планируемое значение для 2026 г. – 6,9 млн. м³ [11].

Эти значения сходны с оценками ремонтного дноуглубления в Арктике до 2030 г., которые будут необходимы после реализации планов по строительству и расширению гидротехнических сооружений. При этом уже в настоящий момент грузообороты Арктического бассейна превышают грузообороты Каспийского бассейна приблизительно в 10 раз, а по мере развития СМП это значение, вероятно, будет расти.

Дальневосточный бассейн занимает важное место в российском морском грузообороте. В 2025 г. его доля достигла максимума в 28,5%, а в течение последних 10 лет она стабильно находилась на уровне 25–27%, при этом наблюдался последовательный рост абсолютных значений грузооборота [7], благодаря укреплению торгово-партнерских отношений со странами Востока, в особенности с Китаем.

Развитие морских портов Дальнего Востока сегодня приобрело дополнительную актуальность на фоне увеличения рисков при использовании портов Балтийского, Азовского и Черного морей. Кроме того, порты Дальнего Востока являются опорными для СМП, обширное развитие которого планируется в ближайшие годы.

Дноуглубление позволяет расширять морские порты Дальнего Востока для увеличения их пропускной способности и выполнения запросов транспортной отрасли по увеличению грузооборота. Так, расширение терминалов реализовано в портах Восточный, Ванино; планируется увеличение пропускной способности портов Посьет, Эльга [12]. Реализация этих планов требует участия дноуглубительного флота.

Таким образом, наибольшее значение для российского морского транспорта продолжают иметь Балтийский и Азово-Черноморский бассейны. Можно ожидать уменьшения удельного веса грузопотока в этих бассейнах, однако из-за концентрации населения и производственных мощностей в европейской части страны оно не станет радикальным. В связи с этим объемы дноуглубления в этих бассейнах не претерпят резкого снижения в ближайшие годы.

Роль Дальневосточного бассейна растёт, отчасти компенсируя сложившуюся ситуацию в европейских морях России. Вместе с этим будут

расти объёмы капитального и ремонтного дноуглубления.

Арктический бассейн имеет высокий потенциал для развития, однако реализация всех амбициозных планов по его интеграции в единую транспортную систему России, а также его развития как международного транспортного коридора являются долгосрочным проектом. Для этого необходимы дноуглубительные мощности как в краткосрочной, так и в долгосрочной перспективе.

Создание малого землесоса, способного использовать ВВП и ходить между акваториями Арктики (в безледовый период) и в морях европейской части России, обусловливается динамикой и характером развития грузоперевозок в различных морских бассейнах.

ФЛОТ САМООТВОЗНЫХ ЗЕМЛЕСОСОВ

Сегодня российский флот самоотвозных землесосов, построенных после 2000 г., представлен тремя судами пр. TSHD1000 (объем грузового трюма 1000 м³) и тремя судами пр. TSHD2000 (объем грузового трюма 2000 м³).

Флот, принимавший участие в реализации российских дноуглубительных проектов до ухода с рынка западных компаний, представлен в основном иностранными судами двух основных типоразмеров по объему трюма: 3500–5000 м³ и 11 000–14 000 м³. При строительстве порта Сабетта также использовались два самоотвозных землесоса с объемом трюма 18 000 м³ и один – 45 458 м³, один из крупнейших в мире [13].

Как отмечено ранее, различные организации в судостроительной отрасли имеют разные видения оптимальных характеристик требуемого самоотвозного землесоса. В табл. 2 приведены характеристики существующих российских самоотвозных землесосов, а также судов, предлагаемых различными участниками морской отрасли в качестве перспективных [13–25].

Характеристики самоотвозных землесосов, предлагаемых ФГУП «Гидрографическое предприятие» и ООО «СДК», приблизительно соответствуют типоразмерам иностранных судов, которые эксплуатировались на российских проектах. Исследование же ПКБ «Петробалт» [13] ориентировано на определение характеристик наиболее крупного самоотвозного землесоса, строительство которого возможно в России.

Существующие суда значительно уступают по вместимости использовавшимся в России иностранным самоотвозным землесосам.

ХАРАКТЕРИСТИКИ ВНУТРЕННИХ ВОДНЫХ ПУТЕЙ

Ключевыми характеристиками, ограничивающими мобильность самоотвозного земснаряда, являются максимальные разрешенные габариты для прохода ВВП. Они приведены в табл. 3 [26–28].

Как видим, ограничения Беломорско-Балтийского канала наиболее жесткие среди рассматриваемых, поэтому удовлетворяющее им судно способно проходить по всем рассматриваемым ВВП.

Ограничения Волго-Балтийского водного пути и Волго-Донского канала целесообразно рассматривать в комплексе. Это обусловлено схожестью их ограничений по ширине и осадке; кроме того, без возможности прохода Волго-Донским каналом судно не способно использовать ВВП для перехода в акваторию Азово-Черноморского бассейна.

На основе данных табл. 3 можно определить, какие из существующих судов и судов, предлагаемых в качестве перспективных, соответствуют глубинам ВВП (табл. 4).

Из-за больших значений ширины судов ни одно из рассматриваемых не удовлетворяет ограничениям по габаритам для прохода Беломорско-Балтийским каналом. Существующие самоотвозные землесосы, а также перспективное судно с объемом трюма 4000 м³ способны проходить Волго-Балтийским водным путем и Волго-Донским каналом.

Анализ маршрутов предполагает определение длины перегона судна между морскими бассейнами и времени его преодоления. ВВП с другими морскими бассейнами России (табл. 6).

Для каждого бассейна выбрана точка отсчета, чтобы обеспечить единство расчетов:

- Арктический бассейн – пролив Карские Ворота,
- Балтийский бассейн – морской порт Усть-Луга,
- Азово-Черноморский бассейн – морской порт Темрюк,
- Каспийский бассейн – Астраханский морской порт.

Максимальные габариты судов для прохода ВВП

Таблица 3

Название участка ВВП	Водный путь		Ограничения по габаритам судна, м
	начало	конец	
Беломорско-Балтийский канал	г. Повенец, Онежское оз.	г. Беломорск, Белое море	135 × 14,1 × 3,75
Волго-Балтийский водный путь	г. Санкт-Петербург, Финский залив	г. Рыбинск, р. Волга	196,8 × 17,73 × 4
Волго-Донской канал	г. Волгоград, р. Волга	Цимлянское вдхр., р. Дон	145 × 18 × 4

Возможность прохода существующих и предлагаемых самоотвозных землесосов по ВВП

Таблица 4

Характеристика и участок ВВП	Значения							
	ФГУП «Росморпорт»		ФГУП «Гидрографическое предприятие» (ГК «Росатом»)		ООО «Строительная дноуглубительная компания» (СДК)		н/д	
Заказчик								
Проектант	Damen Shipyards Group		ЦМКБ «Алмаз»		н/д		ПКБ «Петро-бальт»	
Объем трюма, м ³	1000	2000	4000	8000	5000	10 000	6000	11 000 – 12 000
Беломорско-Балтийский канал	Нет	Нет	Нет	Нет	Нет	Нет	Нет	Нет
Волго-Балтийский водный путь	Да	Да	Да	Нет	н/д	Нет	Нет	Нет
Волго-Донской канал	Да	Да	Да	Нет	н/д	Нет	Нет	Нет

Исследуемые варианты маршрутов

Таблица 5

Бассейн	Соответствие ограничениям		
	Вариант маршрута (условное обозначение)		
	№1 (ББК+, ВБ/ВД+)	№2 (ББК-, ВБ/ВД+)	№3 (ББК-, ВБ/ВД-)
Беломорско-Балтийского канала	Да	Нет	Нет
Волго-Балтийского водного пути и Волго-Донского канала	Да	Да	Нет

Длина и время преодоления маршрутов между морскими бассейнами России

Таблица 6

Маршрут № 1	Расстояние, км	Время в пути, сут.	Маршрут № 2	Расстояние, км	Время в пути, сут.	Маршрут № 3	Расстояние, км	Время в пути, сут.
Арктический бассейн – Балтийский бассейн								
пр. Карские Ворота, Беломорск, Повенец, Санкт-Петербург, Усть-Луга	2330	7,9	пр. Карские Ворота, пр. Большой Бельт, Усть-Луга	5300	9,9	пр. Карские Ворота, пр. Большой Бельт, Усть-Луга	5300	9,9
Балтийский бассейн – Азово-Черноморский бассейн								
Усть-Луга, Санкт-Петербург, Рыбинск, Волгоград, Цимлянское вдхр., Ростов-на-Дону, Темрюк	4180	13,9	Усть-Луга, Санкт-Петербург, Рыбинск, Волгоград, Цимлянское вдхр., Ростов-на-Дону, Темрюк	4180	13,9	Усть-Луга, пр. Большой Бельт, пр. Гибралтар, пр. Босфор, Керченский пр., Темрюк	9500	17,8
Арктический бассейн – Азово-Черноморский бассейн								
пр. Карские Ворота, Беломорск, Повенец, Рыбинск, Волгоград, Цимлянское вдхр., Ростов-на-Дону, Темрюк	5320	17,4	пр. Карские Ворота, пр. Большой Бельт, Санкт-Петербург, Рыбинск, Волгоград, Цимлянское вдхр., Ростов-на-Дону, Темрюк	9450	23,8	пр. Карские Ворота, пр. Гибралтар, пр. Босфор, Керченский пр., Темрюк	11000	20,6
Арктический бассейн – Каспийский бассейн								
пр. Карские Ворота, Беломорск, Повенец, Рыбинск, Астрахань	4900	16,3	пр. Карские Ворота, пр. Большой Бельт, Санкт-Петербург, Рыбинск, Астрахань	8750	22,0	Невозможен		
Балтийский бассейн – Каспийский бассейн								
Усть-Луга, Санкт-Петербург, Рыбинск, Астрахань	3750	12,8	Усть-Луга, Санкт-Петербург, Рыбинск, Астрахань	3750	12,8	Невозможен		
Азово-Черноморский бассейн – Каспийский бассейн								
Темрюк, Ростов-на-Дону, Цимлянское вдхр., Волгоград, Астрахань	1370	3,7	Темрюк, Ростов-на-Дону, Цимлянское вдхр., Волгоград, Астрахань	1370	3,7	Невозможен		

Для расчета времени в пути принято следующее:

- затраты времени на прохождение каналов оценены следующим образом:
- Беломорско-Балтийский канал – 2 сут.,
- Волго-Балтийский канал – 3 сут.,
- Волго-Донской канал – 12 ч. (0,5 сут.)
- скорость судна в речной акватории – 15 км/ч (ок. 8 уз), что типично для транспортного судна при движении по реке;
- скорость судна в морской акватории – 12 уз, что является референсным значением скорости самоотвозного землесоса с объемом трюма 4000–5000 м³ [24], так как именно оно предлагается компаниями в качестве приоритетного в краткосрочной перспективе.

При анализе рассматриваются три варианта, определяющих соответствие судна габаритным ограничениям ВВП. Данные варианты приведены в табл. 5.

Эффективное использование ВВП для перегона самоотвозного землесоса между акваториями может снизить время в пути на 15–20%. Это важно для реализации работ в сжатые сроки с учетом ледовой обстановки или погодных условий. Однако ключевое преимущество использования ВВП – радикальное (более чем в 2 раза) сокращение протяженности маршрута относительно морских маршрутов, а значит и меньшее потребление топлива, что дополнительно обуславливается меньшими скоростями движения на ВВП.

Данные табл. 6 показывают, что эффективное построение маршрутов подразумевает возможность прохода судна Беломорско-Балтийским каналом. Вариант № 2 уступает варианту № 1 во всех случаях, где предполагается переход из Арктического бассейна. При этом по времени перегона из Арктики в Азовское море вариант № 2 уступает не только варианту № 1, но и варианту № 3, если судно движется лишь по морским акваториям.

Данные табл. 6 показывают, что самоотвозные землесосы, планируемые к постройке ФГУП «Гидрографическое предприятие» и ООО «СДК», удовлетворяют ограничениям Волго-Балтийского водного пути и Волго-Донского канала и не удовлетворяют ограничениям Беломорско-Балтийского канала. С одной стороны, при перегоне в Арктику эти суда будут следовать длинным маршрутом через Атлантический океан, с другой – если планируется их перегон в Каспийское и Азовское моря по ВВП, их габариты

не могут превышать ограничения Волго-Донского канала и Волго-Балтийского водного пути.

Так как вариант № 3 не ограничен габаритами ВВП, здесь могут эксплуатироваться перспективные суда большой вместимости, их скорость хода также может быть выше, что приведет к снижению времени в пути.

Таким образом, данные табл. 6 показывают, что с точки зрения логистики эффективны самоотвозные землесосы, предназначенные для эксплуатации на маршрутах № 1 и № 3. Это подтверждает высказанное ранее предположение о целесообразности создания самоотвозных землесосов двух типов:

- малого для варианта № 1 – перехода между бассейнами с использованием всех основных ВВП, что позволит снизить время в пути и существенно экономить топливо;
- большого, практически неограниченного по характеристикам, в том числе по вместимости, для варианта № 3 – перемещения между бассейнами только по морю.

Малый землесос: подходы к определению характеристик

Определение характеристик малого землесоса должно основываться на ограничениях Беломорско-Балтийского канала (см. табл. 3): длина судна – не более 135 м, ширина – не более 14,1 м, осадка при перегоне – не более 3,75 м.

По данным International Association of Dredging Companies (ок. 80 судов с объемом трюма 1000–18 000 м³) [24] и International Dredging Directory (ок. 240 судов с объемом трюма 1000–3900 м³) [25] судном с наибольшим объемом трюма является «Kenford» под флагом Белиза (IMO: 8821826, ранее – «Argonaut I») (рис. 1).



Рис. 1. «Kenford» в грузу [29]

Характеристики судна «Kenford»

Характеристика	Значение
Ширина наибольшая, м	14,0
Длина наибольшая, м	81,86
Объем трюма, м ³	3000
Высота борта, м	6,3
Осадка, м:	
– в балласте	3,1
– в грузу	5,25
Диаметр всасывающего пульпопровода, мм	1*800
Дедвейт, т	3503
Макс. глубина дноуглубления, м	25

При этом минимальное значение объема трюма при заданной ширине, имеющееся в базе данных, – 900 м³. Подобный разброс значений показывает, что на максимальный объем грунтового трюма самоотвозного землесоса и грузоподъемность значительно влияют не только его главные размерения, но и район плавания, рабочие условия дноуглубления, ледовый класс, плотность грунта.

Объем трюма 3000 м³ у земснаряда «Kenford» свидетельствует о низкой плотности добываемого грунта, а также о значительных ограничениях рабочих условий. Например, в грузу это судно имеет крайне низкий надводный борт (рис. 1)

Предварительный анализ баз данных [24, 25] позволяет предположить, что реалистичным максимальным значением объема трюма при заданных габаритных ограничениях и рабочих условиях российских акваторий является 2300–2500 м³.

Результаты исследования ПКБ «Петробалт» [13] показывают, что малый землесос с характеристиками, приведенными выше или близкими к ним, может быть построен в России.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

При текущем направлении развития морских акваторий в России це-

лесообразно строительство малого самоотвозного землесоса, способного перемещаться между морскими бассейнами по ВВП. Это позволит экономить время в пути и топливо за счет радикального сокращения расстояний. Развитие и детализация идей, обозначенных в данной работе, должны стать предметом дальнейших исследований.

Всеми участниками отрасли отмечается, что в перспективе следует планировать строительство землесоса с объемом трюмов 8000–12 000 т. Исследование показало, что такое судно – большой землесос – будет достаточно эффективен с точки зрения логистики и не сильно уступит малому землесосу во времени в пути. При проектировании такого землесоса следует уделить особое внимание мореходности и топливной эффективности ввиду больших преодолеваемых расстояний.

В исследовании ПКБ «Петробалт» делается вывод о том, что с учетом отечественных мощностей оборудование может быть произведено для самоотвозного землесоса с объемом трюма 6000 м³ [13]. Такое судно не способно перемещаться по ВВП, поэтому его относят к категории большого землесоса. Одним из ключевых препятствий для создания отечественного дноуглубительного флота является нехватка судового комплектующего оборудования. Для решения этой проблемы следует организовать комплексную программу строительства дноуглубительного флота, объединяющую в себе судостроительные и машиностроительные предприятия, Российский морской регистр судоходства, регулирующий государственный орган, научные организации с учетом развития транспортной и гидротехнической отраслей. Помимо флота самоотвозных землесосов, важную роль в строительстве морской инфраструктуры будут играть земснаряды других типов, плавучие краны, грунтоотвозные шаланды, вспомогательные суда.

ЛИТЕРАТУРА

- Доля морского транспорта во внешне-торговых перевозках России составляет около 80% – [Электронный ресурс]//korabel.ru. – URL: https://www.korabel.ru/news/comments/dolya_morskogo_transporta_vo_vneshnetorgovyh_perevozkah_rossii_sostavlyayet_okolo_80.html (дата обращения: 15.04.2026).
- Гидрографическое предприятие Росатома рассказало о результатах своих дноуглубительных работ – [Электронный ресурс]//atomic-energy.ru. – URL: <https://www.atomic-energy.ru/news/2025/11/19/161142> (дата обращения: 15.04.2026).
- Распоряжение Правительства РФ «Об утверждении плана развития Северного морского пути на период до 2035 г.» от 1.08.2022 г. № 2115-р.
- Распоряжение Правительства РФ «Об утверждении прилагаемого плана развития инфраструктуры Северного морского пути на период до 2035 г.
- СМП расширится до Трансарктического транспортного коридора – [Электронный ресурс]//Российская газета. – 2025. – 28 августа. – URL: <https://rg.ru/2025/08/28/reg-dfo/s-severa-na-iug-i-obratno.html> (дата обращения: 15.04.2026).
- СМП станет ключевым участком Трансарктического транспортного коридора – [Электронный ресурс]//Аналитический центр при Правительстве Российской Федерации. – URL: <https://ac.gov.ru/news/page/smp-stanet-kluevym-uchastkom-transarkтического-transportnogo-koridora-28052> (дата обращения: 15.04.2026).
- Динамика количественных показателей грузооборота и мощности морских портов России – [Электронный ресурс]//Ассоциация морских торговых портов России. – URL: <https://www.morport.com/rus/content/statistika-0> (дата обращения: 15.04.2026).
- Дноуглубление в России: стратегии развития флота и инфраструктуры для успешного будущего. – Мат-лы сессии XVIII Международ. выставки конференции «Нева-2025».
- Перечень завершённых Северо-Западным бассейновым филиалом проектов по развитию федеральных объектов портовой инфраструктуры в морских портах Большой порт Санкт-Петербург, Калининград и Усть-Луга – [Электронный ресурс]//Росморпорт. – URL: https://www.rosmorport.ru/filials/spb_port_development_completed/ (дата обращения: 15.04.2026).
- Развитие Азово-Черноморским бассейновым филиалом объектов портовой инфраструктуры и флота – [Электронный ресурс]//Росморпорт. – URL: https://www.rosmorport.ru/filials/nvr_developmentofports/ (дата обращения: 15.04.2026).
- Объём дноуглубительных работ ФГУП «Росморпорт» в 2025 году превысил 9,7 млн. куб.м. [Электронный ресурс]//Морвести. – URL: <https://morvesti.ru/news/1679/120576/> (дата обращения: 15.04.2026).
- Строительство 17 морских терминалов намечено в РФ до 2036 года – [Электронный ресурс]//Интерфакс. – URL: <https://www.interfax.ru/russia/1046222> (дата обращения: 15.04.2026).
- Афанасьева С. Ю., Кошелев А. В. Самоотвозные земснаряды: потребности, перспективы, характеристики. – Ч. 1//Морской вестник. – 2024. – № 2 (90). – С. 7.
- Регистровая книга/Российский морской регистр судоходства. – СПб: РМРС, 2025.
- Обеспечить технологический суверенитет – [Электронный ресурс]//Транспорт России. – URL: <https://transportrussia.ru/razdely/transportnoe-mashinostroenie/9904-obespechit-tekhnologicheskij-suverenitet-2.html> (дата обращения: 15.04.2026).
- Гидрографическому предприятию необходимо к 2026–2027 годам привлечь около 11 ед. дноуглубительного флота – [Электронный ресурс]//PortNews. – URL: <https://portnews.ru/news/343070/> (дата обращения: 15.04.2026).
- На Северном морском пути появятся земснаряды ледового класса – [Электронный ресурс]//Судостроение.инфо. – URL: <https://sudostroenie.info/novosti/41124.html> (дата обращения: 15.04.2026).
- СДК заказала строительство трюмного землесоса – [Электронный ресурс]//Гидротехника. – URL: https://hydroteh.ru/news/sdk_zakazala_stroitelstvo_trjumnogo_zemlesosa_6284/ (дата обращения: 15.04.2026).
- Самоотвозной земснаряд по российскому проекту можно построить полностью из отечественных комплектующих – [Электронный ресурс]//PortNews. – URL: <https://portnews.ru/news/373773/> (дата обращения: 15.04.2026).
- В России ведется разработка проекта самоотвозных земснарядов с объемом трюмов 4 тыс. и 8 тыс. куб.м – [Электронный ресурс]//Гидротехника. – URL: https://hydroteh.ru/news/v_rossii_vedetsja_razrabotka_proekta_samootvoznih_zemsnarjadov_s_obemom_trjumnov_4_tys_i_8_tys_kub_m_4357/ (дата обращения: 15.04.2026).
- Строительная дноуглубительная компания планирует заложить три земснаряда проекта FPDG3 для работы в Арктике – [Электронный ресурс]//Гидротехника. – URL: <https://portnews.ru/news/357283/> (дата обращения: 15.04.2026).
- Строительная дноуглубительная компания заказала землесос с объемом трюма 10 тыс. куб. м – [Электронный ресурс]//PortNews. – URL: <https://portnews.ru/news/373765/> (дата обращения: 15.04.2026).
- Панов Владимир. Гидрографическое предприятие будет наращивать дноуглубительный флот сначала за счет покупки земснарядов – [Электронный ресурс]//PortNews. – URL: <https://portnews.ru/news/378275/> (дата обращения: 15.04.2026).
- International Association of Dredging Companies (IADC). Fleet List 202– [Электронный ресурс]. URL: <https://www.iadc-dredging.com/news/iadc-fleet-list-2025/> (дата обращения: 15.04.2026).
- International Dredging Directory 2021/IHS Markit. – London: IHS Markit, 2021. – 64 с.
- Приказ Министерства транспорта Российской Федерации от 27.04.2024 № 148 «Об утверждении Правил движения и стоянки судов в Беломорско-Онежском бассейне внутренних водных путей Российской Федерации».
- ФБУ «Администрация «Волго-Дон». Приказ № 270 от 24.07.2018 года «Об утверждении Правил движения и стоянки судов в Волго-Донском бассейне внутренних водных путей Российской Федерации».
- Приказ Министерства транспорта Российской Федерации от 14.11.2025 № 394 «Об утверждении Правил движения и стоянки судов в Волго-Балтийском бассейне внутренних водных путей РФ».
- Kenford – [Электронный ресурс]//MarineTraffic. – URL: <https://www.marinetraffic.com/en/ais/details/ships/shipid:124741> (дата обращения: 15.04.2026). ■

В настоящее время в связи с напряженной геополитической ситуацией в мире, а также динамикой появления и развития морской техники, в том числе беспилотных подводных и надводных аппаратов, становится актуальной необходимость оснащения флота модульными исполнениями различных корабельных систем, которые смогут вернуть свою деятельность без стационарной привязки к объектам-носителям, не требуя их переоснащения или с применением незначительных доработок.

Задачей настоящего технического предложения является создание мобильного спуско-подъемного устройства (МСПУ) для буксируемых подводных аппаратов (БПА) с сохранением их основных параметров, что позволит его размещать на объектах-носителях без каких-либо их доработок, а также доставлять к месту базирования различными видами транспорта.

Технический результат достигается благодаря тому, что МСПУ для БПА содержит размещенные в жестком каркасе: опорное основание, шарнирно установленную на опорном основании поворотную опору, шарнирно соединенную с поворотной опорой подъемную раму с механизмом складывания, двухбарабанную лебедку для намотки кабель-буксира, приводы, систему управления. Жесткий каркас выполнен в виде контейнера, в котором на опорном основании установлен ложемент для размещения БПА в положении по-походному. В верхней части контейнера расположены кабелеукладчик и направляющий ролик.

Ось подъемной рамы выполнена с возможностью вращения в противоположных направлениях. На оси подъемной рамы размещается механизм захвата, в котором удерживается БПА. Механизм захвата снабжен свободно вращающимся шкивом. Кабель-буксир проходит через кабелеукладчик, огибает направляющий ролик и вращающийся

ТЕХНИЧЕСКОЕ ПРЕДЛОЖЕНИЕ ПО СОЗДАНИЮ МОБИЛЬНОГО СПУСКО-ПОДЪЕМНОГО УСТРОЙСТВА ДЛЯ БУКСИРУЕМЫХ ПОДВОДНЫХ АППАРАТОВ В КОНТЕЙНЕРНОМ ИСПОЛНЕНИИ

В. В. Болтенков, гл. инженер,
В. А. Игнашов, начальник отдела,
В. С. Христенко, зам. гл. конструктора,
ЗАО «ЦНИИ СМ»,
контакт. тел. (812) 640 1051

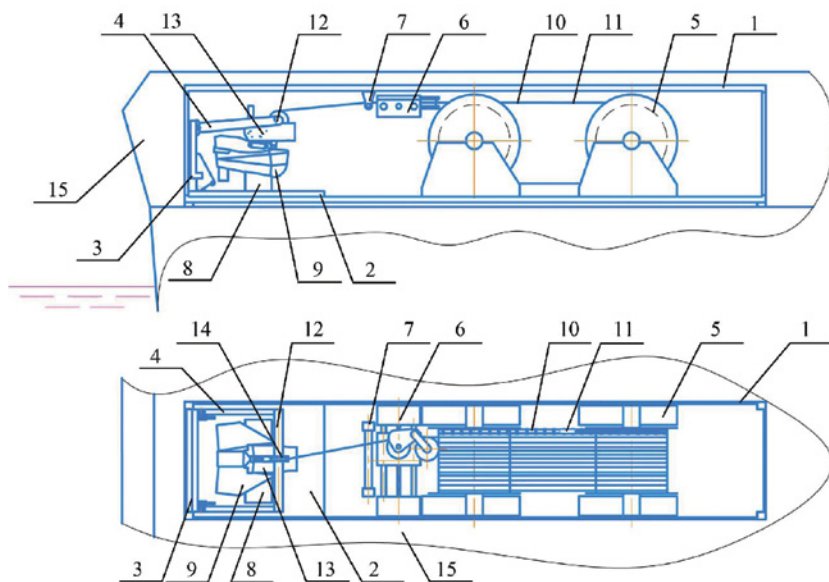


Рис. 1. МСПУ с БПА в положении по-походному

1 – контейнер; 2 – опорное основание; 3 – поворотная опора; 4 – подъемная рама; 5 – двухбарабанная лебедка; 6 – кабелеукладчик; 7 – направляющий ролик; 8 – ложемент; 9 – БПА; 10 – цепь; 11 – кабель-буксир; 12 – ось; 13 – механизм захвата; 14 – вращающийся шкив; 15 – объект-носитель

шкив. Второй конец кабель-буксира закреплен на БПА.

Основное преимущество МСПУ перед стационарным СПУ – это возможность быстро доставить оборудование в любую точку Мирового океана для ус-

тановки на потенциальных объектах-носителях. На рис. 1 изображено МСПУ с БПА в положении по-походному.

На рис. 2, а – в представлены промежуточные положения части МСПУ при постановке БПА.

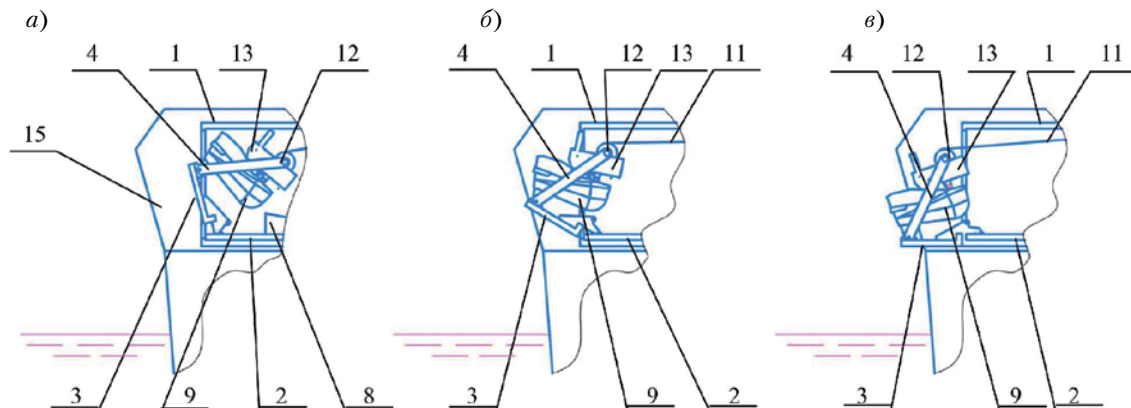


Рис. 2. Этап приведения МСПУ из рабочего положения в положение по-походному: а – разворот на оси поворотной рамы БПА и механизма захвата; б – прохождение БПА и механизма захвата в створе ворот контейнера; в – разворот на оси поворотной рамы БПА и механизма захвата, опрокидывание подъемной рамы за борт корабля
1 – контейнер; 2 – опорное основание; 3 – поворотная опора; 4 – подъемная рама; 9 – БПА; 11 – кабель-буксир; 12 – ось; 13 – механизм захвата; 15 – объект-носитель

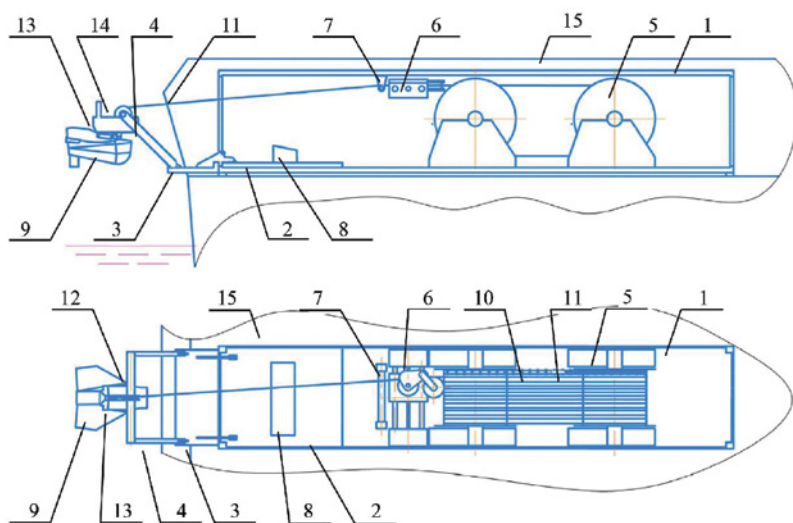


Рис. 3. МСПУ для БПА в рабочем положении

1 – контейнер; 2 – опорное основание; 3 – поворотная опора; 4 – подъемная рама; 5 – двухбарабанная лебедка; 6 – кабелеукладчик; 7 – направляющий ролик; 8 – ложемент; 9 – БПА; 10 – цепь; 11 – кабель-буксир; 12 – ось; 13 – механизм захвата; 14 – вращающийся шкив; 15 – объект-носитель

На рис. 3 изображено МСПУ в рабочем положении (устройство захвата удерживает БПА перед спуском или перед приведением МСПУ в положение по-ходному).

МСПУ (см. рис. 1) содержит размещенные в контейнере 1 опорное основание 2, шарнирно установленную на этом основании поворотную опору 3, шарнирно соединенную с данной опорой подъемную раму 4 с механизмом складывания (на рисунке не показан), двухбарабанную лебедку 5, приводы, систему управления (на рисунке не показаны). В верхней части контейнера 1 расположены кабелеукладчик 6 и направляющий ролик 7.

В контейнере 1 также установлен ложемент 8 для размещения БПА 9 в положении по-ходному. Лебедка 5 выполнена двухбарабанной для возможности размещения в контейнере, на которой закреплен коренной конец кабель-буксира 11. Ось 12 подъемной рамы 4 выполнена с возможностью вращения в противоположных направлениях, а на середине оси 12 жестко размещен механизм захвата 13, в котором удерживается БПА 9. Механизм захвата 13 снабжен свободно вращающимся шкивом 14. Кабель-буксир 11 проходит через кабелеукладчик 6, огибает направляющий ролик 7 и вращающийся шкив 14. Второй конец кабель-буксира 11 закреплен БПА 9.

МСПУ размещено в стандартном транспортном 40-футовом контейнере. В положении по-ходному БПА 9 установлен на ложементе 8 и удерживается в механизме захвата 13. Кабель-буксир 11, идущий от БПА 9, охватывает вращающийся шкив 14 и направляющий ролик 7 и, проходя через кабелеукладчик 6, укладывается в один слой на барабаны лебедки 5.

МСПУ работает следующим образом: МСПУ, размещенное в контейнере 1, доставляют к месту использования. Доставка до места монтажа на объекте-носителе 15 может осуществляться водным путем, авиатранспортом и другими способами. Далее устройство устанавливают на требуемое для проведения работ место (открытая или закрытая палуба) на объекте-носителе 15 на определенном и достаточном расстоянии от кормового среза объекта-носителя 15 для обеспечения его безопасной работы, где и происходит его приведение в рабочее положение.

С пульта управления (на рисунках не показан) подают сигнал на вращение лебедки 5, на травление кабель-буксира 11, разворот поворотной опоры 3 и подъемной рамы 4, на вращение оси 12 этой рамы. Поворотная опора 3 из вертикального положения приходит в горизонтальное, подъемная рама 4 разворачивается в сторону кормы объекта-носителя 15, ось 12 на подъемной раме 4 поворачивает (вращает в противоположных направлениях) механизм захвата 13 с БПА 9 в положение, благоприятное для спуска БПА 9 на воду. После приведения МСПУ (см. рис. 3) в рабочее положение по сигналу с пульта управления оператор подает команду на раскрытие механизма захвата 13 и осуществляет спуск на воду БПА 9 на кабель-буксире 11 при помощи вращающегося шкива 14, направляющего ролика 7, кабелеукладчика 6 и двухбарабанной лебедки 5.

Движение (кинематика) элементов МСПУ (см. рис. 2) происходит синхронно, по заложенному в систему управления МСПУ рабочему алгоритму программы, которая загружена в микроконтроллер модуля системы управления. Тем самым достигается нужная кинема-

тика МСПУ, при которой БПА 9 вместе с механизмом захвата 13, совершая вращательно-поступательные движения, проходит створ ворот контейнера 1.

Движение (запрограммировано в систему управления МСПУ) поворотной опоры 3, подъемной рамы 4 и оси 12 на подъемной раме 4 осуществляется приводами (электрическими или гидравлическими). Отслеживание поворота оси 12 подъемной рамы 4 осуществляется с помощью датчиков поворота. Крайние положения подвижных механических частей отслеживаются концевыми выключателями.

Подъем БПА на объект-носитель и приведение МСПУ в походное положение выполняются в обратной последовательности.

Предложенная конструкция МСПУ позволяет обслуживать БПА в контейнере, при данном режиме необходимо отстыковать БПА от механизма захвата, а МСПУ привести в рабочее положение.

Конструкция предложенного технического решения имеет следующие преимущества:

- позволяет размещать МСПУ в стандартном 40-футовом контейнере, обеспечивая его мобильность и возможность в короткие сроки установить на различных носителях без переоборудования или при незначительном изменении конструкции объекта;
- обеспечивает защиту конструкций и систем МСПУ при транспортировке;
- возможность хранения БПА по-ходному и их обслуживания непосредственно внутри контейнера;
- возможность размещения в контейнере всего оборудования, в том числе пульта управления, гидравлического оборудования, электрического силового оборудования, электрического оборудования системы управления МСПУ, что существенно уменьшает занимаемый объем БПА на объектах-носителях.

Таким образом, представленное МСПУ целесообразно применять для оснащения мобильных исследовательских групп, аварийно-спасательного флота и других морских объектов, поскольку его можно быстро развернуть для проведения цикла работ, обеспечить полную сохранность дорогостоящего БПА при транспортировке и универсальную интеграцию с существующими объектами-носителями без дополнительных инженерных вмешательств и существенных финансовых затрат. Использование данного устройства позволит существенно расширить географию, функциональность и оперативность проведения подводных исследований, поисково-обследовательских и других операций. ■

Развитие систем автоматизированного проектирования в судостроении и переход в систему информационного проектирования делает необходимым формализацию методов создания поверхности корпуса судна. Применяемые методы должны опираться на накопленный опыт проектирования формы корпуса и обеспечивать бесшовную интеграцию в систему информационного моделирования.

К особенностям поверхности корпуса судов можно отнести большой диапазон кривизны (от нескольких десятков миллиметров до тысяч метров), наличие сломов, сложных составных элементов, наличие технологических особенностей производства, накладывающих ограничения на форму поверхности.

Подходы к топологическому разбиению поверхности корпуса судов на элементы сделаны в работах [9, 11].

Общепризнано разделение сложной поверхности корпуса судна на простые элементы, сопрягаемые друг с другом. Так, достаточно часто отдельно выполняется построение обтекателей, мортир и иных элементов, «дополняющих» основную корпус.

В современных системах проектирования формы корпуса для задания поверхности используются в основном два математических представления поверхностей – NURBS-поверхности и поверхности деления («Sub D», subdivision surfaces). Инструменты работы как с одним, так и с вторым достаточно хорошо разработаны, так как эти представления поверхностей применяются в других отраслях промышленности [1, 2, 6].

Цель работы – систематизация существующих и описание новых инструментов построения поверхности корпуса судна каркасно-кинематическим методом.

РЕАЛИЗАЦИЯ КАРКАСНО-КИНЕМАТИЧЕСКОГО МЕТОДА СОЗДАНИЯ ПОВЕРХНОСТИ КОРПУСА

Каркасно-кинематическую модель поверхности корпуса судна можно представить на нескольких уровнях абстракции (табл. 1).

Приведенные уровни абстракции связывают математическое представление поверхностей корпуса судна с его интегральными характеристиками и принятыми терминами описания судовой поверхности. Каждый уровень определяется набором элементов и связанных с ними методов.

Уровни «*Отображение*» и «*Базовая геометрия*» являются вспомогательными и не должны иметь инструментов, доступных пользователю.

НОВЫЕ ИНСТРУМЕНТЫ ПОСТРОЕНИЯ ПОВЕРХНОСТИ КОРПУСА СУДНА КАРКАСНО-КИНЕМАТИЧЕСКИМ МЕТОДОМ

Н.Ю. Часовников, канд. техн. наук, доцент СПбГМТУ,
начальник отдела общего проектирования, ходовых и мореходных качеств
АО «ЦМКБ «Алмаз»,
контакт. тел. + 7 (911) 022 6835, n.chasovnikov@yandex.ru

Таблица 1

Уровни абстракции модели поверхности корпуса судна

Уровень абстракции	Инструмент
Концептуальный	Главные размерения, интегральные характеристики корпуса, основной корпус, выступающие части, диаметральной плоскость, форштевень и т.п.
Каркасно-кинематическая модель	Опорные, вспомогательные и направляющие кривые, виды сечений, поверхности, законы изменения параметров (в виде графических или аналитических зависимостей)
Инструменты построения	Кривая NURBS, аппроксимирующая кривая, проекция кривой, кривая по проекциям, линейчатая поверхность и т.п.
Базовая геометрия	NURBS-кривые, NURBS-поверхности
Отображение	Полигональное представление

Основная часть инструментов, с помощью которых пользователь взаимодействует с геометрической моделью, относится к уровню «*Инструменты построения*».

Уровень «*Каркасно-кинематическая модель*» – организующий, предусматривает функциональные роли для объектов геометрической модели (в основном пространственных кривых, построенных с использованием различных инструментов) в рамках каркасно-кинематического метода построения.

К «*Концептуальному*» уровню относятся подходы к учету требований по традиционным характеристикам корпуса судна (интегральным характеристикам, строевым и т.п.) и методы контроля этих характеристик. В CAD-системах обычно группа подобных инструментов называется *инструментами анализа поверхности*. Для целей проектирования корпуса судна необходим особый набор таких инструментов, включающий отображение традиционных сечений (шпангоуты, батоксы, ватерлинии), строевой по шпангоутам, объемных характеристик корпуса (коэффициенты полноты, водоизмещение, положение центра величины), а также набор инструментов контроля качества поверхности (линии кривизны, контроль непрерывности, отображение гауссовой кривизны, «зебры» и т. п.).

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЕ КРИВЫХ И ПОВЕРХНОСТЕЙ

В работе предусматривается параметрическое представление геометрических объектов (кривых и поверхнос-

тей). В соответствии с общепринятой практикой единственный параметр обозначается буквой u , а второй – v .

Аналитические кривые (отрезки прямой, дуги окружности, конические сечения) также представляются в параметрическом виде – NURBS-кривых. Для представления поверхностей, создаваемых каркасно-кинематическим методом, широко применяются NURBS-поверхности. Разработан обширный математический аппарат работы с NURBS-поверхностями, в том числе создаваемых на основе NURBS-кривых.

NURBS-кривая в классическом представлении имеет вид

$$C(u) = \frac{\sum_i w_i N_{i,p}(u) P_i}{\sum_i w_i N_{i,p}(u)}.$$

Контрольные точки P_i NURBS-кривой могут находиться в трехмерном пространстве

$$P \in \mathbb{R}^3$$

или на плоскости

$$P \in \mathbb{R}^2.$$

Параметр изменяется в диапазоне

$$u \in [u_0, u_1].$$

Применяются два способа задания NURBS-кривой: *прямой* (координаты контрольных точек задаются численно) и *производный* (координаты контрольных точек и вектор узлов определяются решением задачи аппроксимации методом наименьших квадратов). Для сохранения иерархии в прикладных программах хранится информация о тех объектах, на основании которых была построена производная NURBS-кривая. NURBS-поверхность представляет собой параметрическую поверхность вида

$$S(u, v) = \frac{\sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^m N_{ip}(u) M_{jq}(v) w_{ij} p_{ij}}{\sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^m N_{ip}(u) M_{jq}(v) w_{ij}}.$$

Она определяется следующими элементами:

- степень в двух направлениях (не обязательно одинаковой);
- управляющими точками;
- вектором узловых значений.

ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ КАРКАСНО-КИНЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ

Каркасno-кинематический метод построения поверхностей известен достаточно давно [1, 2, 3, 7] и представляет собой построение поверхностей перемещением сечения заданного вида вдоль направляющих, изменяющих форму сечения. Применение этого метода для построения поверхности корпуса судна органично связано с традиционным представлением поверхности корпуса в виде теоретического чертежа – набора кривых в параллельных сечениях.

В практике проектирования судов для построения поверхности корпуса каркасно-кинематическим методом в качестве сечений обычно используются относительно простые кривые – отрезки прямых, конические сечения (рациональные кривые Безье второго порядка) и кривые Безье третьего порядка (B-сплайн третьего порядка с четырьмя точками).

Перечисленные виды кривых могут иметь не более одного перегиба, что в общем недостаточно для представления сечения корпуса судна. Поэтому поверхность корпуса судна задается цепочкой поверхностей, имеющей непрерывность не ниже G0 (сломы) и G1 (равенство касательных). Равенство вторых производных (непрерывность G2) – необязательное требование для корпусов судов.

Формально построение поверхности каркасно-кинематическим методом можно представить как

$$S = O(\Phi, B, A, S),$$

где S – поверхность, $O(\cdot)$ – определенный набор операций, Φ – вид сечения, B – набор опорных кривых, A – набор вспомогательных кривых, S – направляющая кривая, определяющая направление сечений.

Наличие вспомогательных кривых определяется видом сечения.

Рассмотрим отдельно компоненты каркасно-кинематической модели поверхности судна.

Опорные и вспомогательные кривые. Независимо от вида используемого сечения основным элементом каркасно-кинематической модели являются опорные кривые $B(u)$, которые выполняют роль двух ребер строящейся на их основе поверхности.

Вспомогательные кривые $A(u)$ опре-

деляют данные, необходимые для создания сечения выбранного вида.

Для построения гладкой поверхности необходимо, чтобы опорные и вспомогательные кривые были гладкими (имели непрерывность не ниже G1). На уровне инструментов построения такому условию соответствуют аналитические кривые (отрезки прямых, дуги и конические сечения) и параметрические кривые (NURBS-кривые). Обычно опорные и вспомогательные кривые являются пространственными.

Часто для сохранения топологической ясности выгоднее определить опорные кривые не единой кривой, а цепочкой кривых, связанных непрерывностью не ниже G1. В таком случае в инструментах моделирования, реализующих каркасно-кинематический метод, применяется аппроксимация цепочки кривых единой NURBS-кривой, алгоритмы которой широко известны [5, 7, 9, 10, 11]. Следует отметить, что определение непосредственно пространственной кривой может быть неудобно. В таком случае более понятным для пользователя может быть способ получения пространственной кривой как производной (в смысле, созданной на основе других объектов моделирования). Так, наиболее широко применяются инструменты создания пространственной кривой по двум проекциям, проецирование кривой на плоскость или поверхность, создание кривой на поверхности. Дополнительные инструменты создания пространственной кривой описаны в следующем разделе.

Направляющие кривые. Ориентация секущих плоскостей при построении поверхности каркасно-кинематическим методом обычно определяется двумя способами:

- постоянной ориентацией, заданной

нормальным вектором;

- ориентация задается вектором, касательным к направляющей кривой.
- Во втором случае в качестве направляющей кривой может быть использована как плоская, так и пространственная кривая.

Особое внимание требуют использования криволинейных кривых в качестве направляющих. В этом случае набор секущих плоскостей, нормальных к направляющей кривой, может пересекаться, что приводит к самопересечению поверхности (рис. 1).

Можно выделить несколько преимуществ использования отрезка прямой в качестве направляющей:

- отсутствуют пересечения секущих плоскостей друг с другом;
- упрощается контроль протяженности поверхности.

Сечения. Как уже отмечалось, в качестве сечений при построении поверхности корпуса судна каркасно-кинематическим методом могут использоваться отрезки прямых, кривые конических сечений, и кривые Безье третьего порядка (рис. 2).

В зависимости от используемого вида сечения требуется особый набор опорных кривых.

Для сечения в виде отрезка прямой требуются две концевые опорные кривые $B_0(u)$ и $B_1(u)$.

Для сечения в виде конических сечений требуется две концевые опорные кривые и одна или более вспомогательных кривых – $B_0(u)$, $B_1(u)$ и $A(u)$.

Для сечения в виде кривой Безье третьего порядка требуются две концевые опорные кривые и две вспомогательные кривые – $B_0(u)$, $B_1(u)$, $A_0(u)$ и $A_1(u)$.

Непрерывность (G0) определяется тем, что для построения поверхностей в качестве конечной концевой направля-

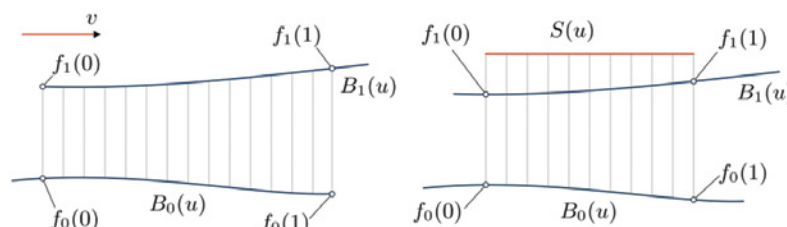


Рис. 1. Построение плоскостей сечений с использованием нормального вектора и направляющей кривой

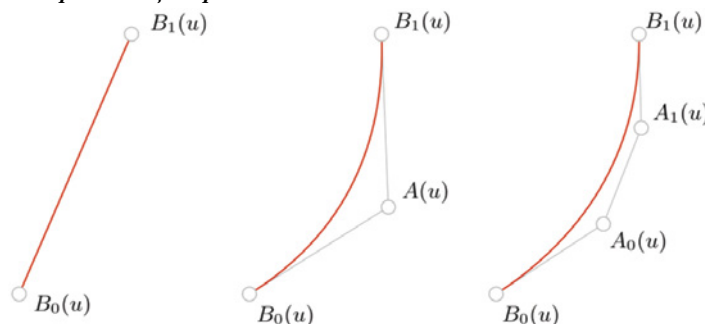


Рис. 2. Виды кривых, используемых в качестве сечений в каркасно-кинематическом методе построения поверхности корпуса судна

ющей первой поверхности и начальной концевой направляющей второй поверхности одна кривая:

$$B_1^0(u) = B_0^1(u).$$

Непрерывность (касательность, G1) участков поверхности определяется принадлежностью четырех кривых – $B_1^0(u)$, $B_0^1(u)$, $A^0(u)$ и $A^1(u)$ – одной линейчатой поверхности и выполнении условия непрерывности G0 (рис. 3).

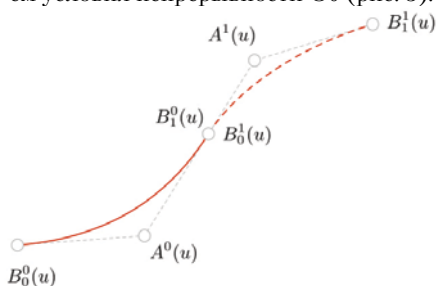


Рис. 3. К определению условий непрерывности кривых

В общем случае ни кривая Безье третьего порядка, ни кривая конического сечения, ни тем более отрезок прямой не могут полностью описать сечение поверхности корпуса судна. Подход в каркасно-кинематическом методе создания поверхности корпуса судна заключается в создании последовательности «простых» поверхностей сечения, описывающей сечение поверхности корпуса судна. На рис. 4 приведен пример описания сечения поверхности корпуса судна (шпангоутного сечения) несколькими участками поверхностей сечения.

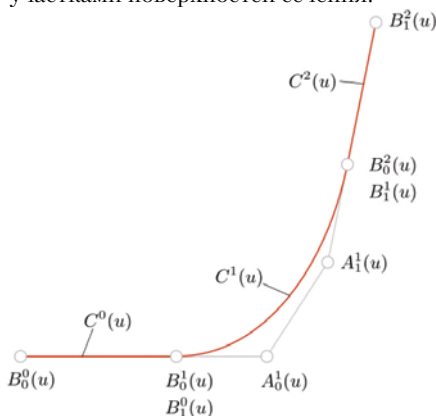


Рис. 4. Участки поверхности сечения для описания шпангоутного сечения корпуса

Таким образом, можно говорить о цепочке связанных поверхностей, образующих поверхность корпуса судна, и о ее иерархической природе.

ИНСТРУМЕНТЫ ДЛЯ РЕАЛИЗАЦИИ КАРКАСНО-КИНЕМАТИЧЕСКОГО МЕТОДА СОЗДАНИЯ ПОВЕРХНОСТИ КОРПУСА СУДНА

Рассмотрим геометрические инструменты построения, необходимые для реализации формальной структуры каркасно-кинематической модели поверхности корпуса судна. Необходимым элементом системы создания по-

верхности корпуса судна каркасно-кинематическим методом является система размеров и геометрических ограничений (dimensioning and geometric constraints).

В системах компьютерного моделирования (CAD) широко распространен подход создания так называемых эскизов (sketch) – объектов построения, содержащих цепочки плоских кривых, расположенных в одной заданной плоскости. Построение и редактирование подобных эскизов выполняется в этой плоскости с широким использованием системы размеров и геометрических ограничений.

Основные инструменты создания плоских кривых в составе эскизов включают ряд аналитических кривых (отрезки прямых, дуги, эллиптические дуги, конические сечения) и параметрические кривые (сплайны различных видов).

Также присутствуют инструменты для создания производных кривых – проецированием ребер или пересечением поверхностей плоскостью эскиза. Набор инструментов создания эскизов рассматривается в качестве базового при реализации каркасно-кинематического метода создания поверхности корпуса судна.

Размещение объектов эскиза в трехмерном пространстве модели выполняется с использованием матриц трансформации

$$P_{3D} = T \times R \times P_L,$$

где T – матрица перемещения, R – матрица поворота, P_L – координаты в локальной системе координат.

Инструменты создания пространственной кривой включают как непосредственное создание, так и создание производной кривой. В первом случае координаты вершин кривой задаются непосредственно в трехмерном пространстве с использованием координат, системы геометрических привязок (snapping) или простановкой размеров. Подобные инструменты хотя и присутствуют во большинстве CAD систем, однако не обладают удобством использования.

Чаще применяются инструменты группы создания производных кривых. Основные существующие инструменты включают:

- проецирование плоской кривой (цепочки кривых) на поверхность (или плоскость);
- смещение кривой по поверхности;
- пересечение поверхностей;
- комбинирование проекций;
- объединение цепочки кривых (самостоятельный инструмент);
- создание кривой из ребер поверхностей или тел.

Предлагается иной способ построения пространственной кривой на основе другой пространственной кривой. Способ заключается в построении пространственной кривой смещения отно-

сительно базовой. Направление смещения задается углом к базовому направлению, а расстояние смещения может быть переменным.

Формальная структура инструмента может быть представлена следующим образом:

- базовая кривая $B(u)$;
- кривая, определяющая направления плоскостей сечения $S(u)$;
- вектор или поверхность, определяющая базовое направление смещения $v(u)$;
- закон изменения угла смещения к базовому направлению $\alpha(u)$;
- закон изменения расстояния смещения $d(u)$.

Построение пространственной кривой описанным способом выглядит следующим образом

- определение начальной и конечной точки на базовой кривой;
- аппроксимация базовой кривой единой NURBS-кривой;
- определение значений базового направления, закона изменения угла, закона изменения расстояния и координат аппроксимированной базовой кривой для нескольких значений параметра;
- вычисление координат точек строимой пространственной кривой;
- аппроксимация полученного набора точек единой NURBS-кривой.

Определяется функция перехода между параметром направляющей кривой и параметром базовой кривой

$$u = f_0(t).$$

Тогда каждой точке направляющей кривой соответствует точка на базовой кривой, вектор направления, угол и расстояние смещения

$$t \in [0:1] S(t) B(f_0(t)) v(t) \alpha(t) d(t).$$

В этом случае положение точек пространственной кривой получается следующим образом:

$$C(t) = B(f_0(t)) + R(v(t) + \alpha(t)) \cdot d(t).$$

Полученный набор точек аппроксимируется NURBS-кривой.

Таким образом, заданная пространственная кривая вместе с базовой кривой и кривой, определяющей направление плоскостей сечения, может быть основной для построения линейчатой поверхности. Уравнение такой поверхности имеет вид

$$S(u, v) = (1 - v) \cdot B(u) + v \cdot C(u),$$

где v – параметры по второму направлению.

Другой способ построения пространственной линии заключается в построении ее на переменном расстоянии от базовой кривой вдоль по линейчатой поверхности, определяемой двумя базовыми кривыми как, например, полученными предыдущим способом (рис. 5).

Формальная структура инструмента может быть представлена так:

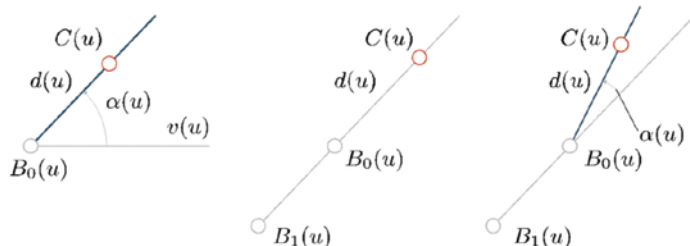


Рис. 5. Новый инструмент создания пространственных кривых

- базовая кривая $B_0(u)$;
- вспомогательная базовая кривая $B_1(u)$;
- кривая, определяющая направления плоскостей сечения $S(u)$;
- закон изменения расстояния смещения $d(u)$.

В этом случае формула для определения точек пространственной кривой выглядит следующим образом:

$$C(t) = B_0(f_0(t)) + R(B_1(f_1(t)) - B_0(f_0(t))) \cdot d(t),$$

где $f_1(t)$ — функция перехода от параметра направляющей кривой к параметру вспомогательной базовой кривой $B_1(u)$, R — оператор матрицы поворота.

Как показано выше, базовая кривая и вспомогательная базовая кривая образуют линейчатую поверхность.

Построение пространственной кривой описанным способом выполняется в соответствии со следующим алгоритмом:

- определение начальной и конечной точки на базовой кривой и вспомогательной базовой кривой;
- аппроксимация базовой кривой и вспомогательной базовой кривой двумя единичными NURBS-кривыми;
- определение значений базового направления, закона изменения расстояния и координат аппроксимированной базовой кривой для нескольких значений параметра;
- вычисление координат точек строимой пространственной кривой;
- аппроксимация полученного набора точек единой NURBS-кривой.

Разработана программная реализация предлагаемого инструмента создания пространственных кривых на языке Python с использованием библиотеки работы с NURBS-поверхностями и кривыми geomdl [8]. На рис. 6 приведены примеры построения кривой по базовой

и вспомогательной, а также линейчатой поверхности между базовой кривой и кривой, построенной новым инструментом.

ВЫВОДЫ

Рассмотрены основные инструменты реализации каркасно-кинематического метода создания поверхности корпуса судна с учетом нескольких уровней абстракции. Математической основой для работы с поверхностями корпуса судна являются NURBS-поверхности и NURBS-кривые. Каркасно-кинематический метод выступает в качестве абстрактного слоя, связывающего традиционные понятия и параметры, описывающие форму корпуса судна, с инструментами его построения, основанными на NURBS. В свою очередь каркасно-кинематический метод как подход к созданию поверхностей на основе перемещения сечения заданного вида вдоль направляющих, изменяющих форму сечения, предъявляет требования к набору инструментов создания и редактирования кривых и поверхностей.

Большая часть существующих в CAD системах инструментов работы с кривыми может быть использована в рамках каркасно-кинематического метода без изменений. Однако полезным дополнением могут быть инструменты, описанные в настоящей статье.

Инструменты построения поверхности при реализации каркасно-кинематического метода должны полностью отражать его суть и разрабатываться специально. Примерами инструментов создания поверхности в CAD системах, отчасти соответствующих каркасно-кинематическому методу, являются инструменты «Поверхность сечения»

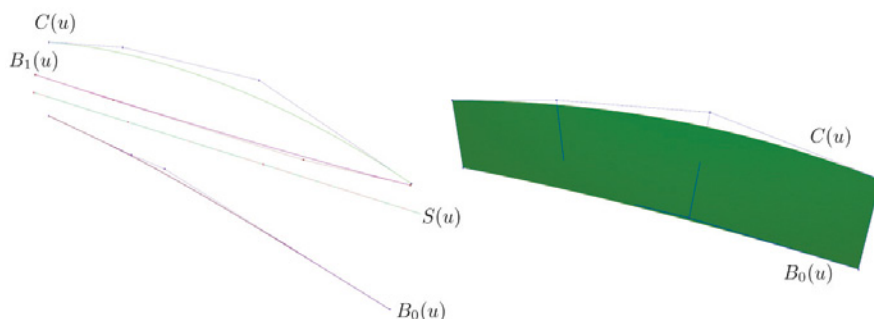


Рис. 6. Пример реализации инструмента

(«Section surface»), «Линейчатая поверхность» («Ruled») в Siemens NX.

Развитие инструментов геометрического моделирования поверхности корпуса судна на основе каркасно-кинематического метода должно быть связано как с адаптацией существующих инструментов CAD-систем, так и с разработкой специализированных инструментов. При этом данные инструменты должны иметь связь с более высоким уровнем абстракции (концептуальным уровнем), позволяющую в том числе контролировать интегральные характеристики создаваемой поверхности корпуса судна.

ЛИТЕРАТУРА

1. Баглаев И.И. Кинематический метод моделирования поверхностей в среде FMSLogo // Вестник БГУ. – Сер.: Математика, информатика. – 2016. – №1. – С. 49–59.
2. Замятин А.В. Развитие каркасно-кинематического метода для формообразования сложно-структурированных поверхностей. – Автореферат диссертации на соискание уч. степеней д-ра техн. наук, Ростов-на-Дону, 2013.
3. Карневич В.В. Построение гидродинамических поверхностей каркасами из кривых Ламе на примере корпуса подводной лодки // Вестник РУДН. – Сер.: Инженерные исследования. – 2022. – № 23(1). – С. 30–37.
4. Попов Е.В., Шоркина И.Н. Автоматизация моделирования поверхности судового корпуса // Омский научный вестник. – 2023. – № 4(188). – С. 13–21.
5. Рыченкова А.Ю., Клименко Е.С., Бородин Л.Н. Геометрическое моделирование и оценка качества каркасной поверхности корпуса судна в САПР Компас-3D // Научные проблемы водного транспорта. – 2020. – № 62. – С.81–90.
6. Моделирование архитектурной формы поверхности зависимых сечений / Чекалин А.А., Решетников М.К., Шпилев В.В., Бородин Л.Н., Рязанов С.А. // Строительство и техногенная безопасность. – 2021. – № 20(72). – С. 53–58.
7. Чекалин А.А., Решетников М.К., Шпилев В.В. Сопряжение каркасно-кинематических поверхностей сплайнами четвертой степени // Вестник ЮУрГУ. – Сер.: Строительство и архитектура. – 2021. – №1. – С.68–74.
8. Bingol O.R., Krishnamurthy A. NURBS-Python: An open-source object-oriented NURBS modeling framework in Python // SoftwareX. – 2019. – Vol. 9. – P. 85–94.
9. Bole M. A Hull Surface Generation Technique Based on a Form Topology and Geometric Constraint Approach: PhD Thesis. – University of Strathclyde, 2002.
10. Desta M.A. (Dr.-Ing., PhD) A Framework for Hull Form Reverse Engineering and Geometry Integration into Numerical Simulations: Thesis / Milkessa Edessa Desta. – University of Rostock, 2016.
11. Ventura M.F.S.F. Ship Hull Representation by Non-Uniform Rational B-Spline Surface Patches: MSc Thesis – University of Glasgow, 1996. ■

1. ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА АНАЛИТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ

1.1. Назначение модели. Аналитическая модель предназначена для комплексной оценки условий обитаемости экипажей и совершенствования эргономических характеристик жилых и служебных помещений перспективных надводных кораблей (НК) ВМФ Российской Федерации. Модель обеспечивает:

- систематизированный подход к оценке качества жизни и работы экипажа на борту корабля;
- выявление узких мест и недостатков в проектных решениях;
- формирование обоснованных рекомендаций по совершенствованию архитектурно-планировочных, инженерно-технических и эргономических решений;
- сопоставление с международными стандартами (НАТО STANAG) и отечественными нормативами;
- прогнозирование влияния условий обитаемости на боеспособность и психофизиологическое состояние личного состава.

1.2. Область применения. Модель применяется на всех стадиях жизненного цикла корабля:

- на этапе проектирования – для обоснования тактико-технического задания (ТТЗ) и корректировки проектной документации;
- на этапе строительства – для контроля соответствия принятым решениям;
- на этапе эксплуатации – для мониторинга условий обитаемости и планирования модернизации;
- на этапе утилизации – для оценки накопленного опыта и переноса лучших практик на перспективные проекты.

1.3. Основные принципы построения модели

1. **Комплексность** – оценка охватывает все аспекты обитаемости: микроклимат, освещение, акустику, эргономику, санитарно-гигиенические условия, психофизиологические факторы.
2. **Многоуровневость** – модель включает подсистемы, модули, критерии и показатели различного уровня детализации.
3. **Количественная измеримость** – все показатели поддаются инструментальному измерению или расчетному определению.
4. **Сравнимость** – результаты оценки могут быть сопоставлены с нормативными значениями и международными аналогами.
5. **Обратная связь** – модель предусматривает механизм корректировки на основе полученных результатов.

АНАЛИТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ОЦЕНКИ УСЛОВИЙ ОБИТАЕМОСТИ ЭКИПАЖЕЙ И СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ ЭРГОНОМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ЖИЛЫХ И СЛУЖЕБНЫХ ПОМЕЩЕНИЙ ПЕРСПЕКТИВНЫХ НАДВОДНЫХ КОРАБЛЕЙ

П.А. Зубков, канд. техн. наук, ген. директор

ООО «Морские комплексные системы»,

О.В. Захарова, ген. директор ООО «Эдем»,

контакт. тел. (812)368 3951, +7 (964) 330 3805

2. СТРУКТУРА АНАЛИТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ

Модель состоит из 11 взаимосвязанных функциональных блоков, объединенных в три уровня.

Уровень 1. Подготовительный (Блоки 1–3)

Блок 1. Входные данные – формирование информационной базы.

Блок 2. Классификация помещений – типология пространств корабля.

Блок 3. Подсистемы оценки – определение направлений анализа.

Уровень 2. Аналитический (Блоки 4–7)

Блок 4. Критерии и показатели оценки – количественные и качественные мерил.

Блок 5. Методы оценки – инструментарий исследования.

Блок 6. Модули оценки – функциональные направления анализа.

Блок 7. Интегральная оценка – обобщение результатов.

Уровень 3. Результативный (Блоки 8–11)

Блок 8. Градация уровней обитаемости – интерпретация результатов.

Блок 9. Принятие решений – формирование выводов.

Блок 10. Рекомендации по совершенствованию – разработка мероприятий.

Блок 11. Выходные данные – формирование отчетной документации.

3. ДЕТАЛЬНОЕ ОПИСАНИЕ БЛОКОВ МОДЕЛИ

Блок 1. Входные данные. Формирует информационную основу для проведения оценки. Включает шесть групп данных:

1.1. Нормативно-правовая база

- Санитарные правила и нормы (СанПиН 2.5.2-703–98 «Суда внутреннего и смешанного плавания», СанПиН 2.5.3650–20).
- Ведомственные строительные нормы (ВСН 35-94/Минобороны РФ).
- Государственные стандарты (ГОСТ).
- Международные стандарты НАТО (STANAG) в области обитаемости военных кораблей.

• Нормативные документы ВМФ РФ.

1.2. Тактико-техническое задание (ТТЗ)

- Назначение и класс корабля.
- Районы базирования и плавания.
- Автономность плавания.
- Численный состав экипажа.
- Требования к боевой устойчивости и живучести.

1.3. Эргономические требования

- Требования к площади и объему на одного человека.
- Требования к высоте помещений.
- Требования к оснащению мебелью и оборудованием.
- Требования к зонам досягаемости и маршрутам движения.

1.4. Данные об экипаже

- Численность и состав (офицеры, мичманы, сержанты, солдаты, матросы).
- Возрастной состав.
- Режимы несения службы (вахты, дежурства, отдых).
- Продолжительность автономного плавания.

1.5. Архитектурно-планировочные решения

- Генеральный план корабля.
- Планы размещения жилых, служебных, общественных и санитарно-бытовых помещений.
- Разрезы и фасады.
- 3D-модели помещений.

1.6. Результаты инструментальных измерений

- Параметры микроклимата (температура, влажность, скорость воздуха).
- Уровни освещенности (естественной и искусственной).
- Уровни шума и вибрации.
- Параметры воздушной среды (состав, ионизация).

Блок 2. Классификация помещений. Помещения корабля классифицируются по функциональному назначению с учетом специфики военно-морского флота:

2.1. Жилые помещения

- Каюты для офицерского состава (одно-, двухместные).
- Каюты для мичманов и старшин.

АНАЛИТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ОЦЕНКИ УСЛОВИЙ ОБИТАЕМОСТИ ЭКИПАЖЕЙ

И СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ ЭРГОНОМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПОМЕЩЕНИЙ НАДВОДНЫХ КОРАБЛЕЙ

Структура модели: 3 уровня · 11 функциональных блоков · 6 подсистем оценки

1 УРОВЕНЬ 1 · ПОДГОТОВИТЕЛЬНЫЙ (Блоки 1-3)



2 УРОВЕНЬ 2 · АНАЛИТИЧЕСКИЙ (Блоки 4-7)



3 УРОВЕНЬ 3 · РЕЗУЛЬТАТИВНЫЙ (Блоки 8-11)



БЛОК 7 · ИНТЕГРАЛЬНЫЙ ИНДЕКС ОБИТАЕМОСТИ (ИИО)

$$ИИО = \frac{\sum(W_i \times K_i)}{\sum W_i}$$

W_i — весовой коэффициент показателя (экспертная оценка) K_i — нормированное значение показателя (факт / норма, $\leq 1,0$)

БЛОК 8 · ГРАДАЦИЯ УРОВНЕЙ ОБИТАЕМОСТИ

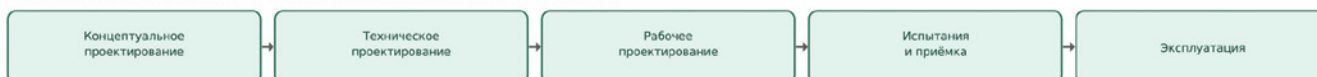
Уровень	Интервал ИИО	Характеристика
1 — Отлично	ИИО $\geq 0,85$	Полное соответствие современным требованиям, высокий комфорт
2 — Хорошо	$0,70 \leq ИИО < 0,85$	Незначительные недостатки без влияния на боеспособность
3 — Удовлетворительно	$0,55 \leq ИИО < 0,70$	Минимальные требования соблюдены, нужна корректировка
4 — Неудовлетворительно	ИИО $< 0,55$	Требуется существенная модернизация

МЕХАНИЗМ ОБРАТНОЙ СВЯЗИ: БЛОК 11 → БЛОК 1

Сбор данных → Анализ → Оценка → Рекомендации → Внедрение → Повторный мониторинг
Результаты эксплуатации возвращаются во входные данные и корректируют весовые коэффициенты



ПРИМЕНЕНИЕ МОДЕЛИ НА ЭТАПАХ ЖИЗНЕННОГО ЦИКЛА КОРАБЛЯ



- Кают-компании.
- Помещения для отдыха.
- 2.2. Служебные помещения**
- Ходовые рубки (рулевая, штурманская).
- Радиорубки.
- Посты управления боевыми системами.
- Помещения боевых информационных центров (БИЦ).
- 2.3. Общественные помещения**
- Столовые и камбузы.
- Клубы и комнаты отдыха.
- Спортивные залы и каюты.
- Библиотеки и учебные классы.
- 2.4. Санитарно-бытовые помещения**
- Душевые и ванные.
- Уборные и умывальни.
- Прачечные и гладильные.
- Сушильные.
- 2.5. Медицинские помещения**

- Амбулатории.
- Лазареты и изоляторы.
- Операционные.
- Аптеки и лаборатории.
- 2.6. Помещения пищеблока**
- Камбузы.
- Пекарни и кондитерские цеха.
- Кладовые и холодильные камеры.
- Посудомоечные.
- Блок 3. Подсистемы оценки.** К каждому классу помещений применяются шесть подсистем оценки:
- 3.1. Микроклиматическая подсистема.** Оцениваются параметры:
 - Температура воздуха (зимний период: 20 °С для жилых, 16–18 °С для служебных, летний период: не более чем на 5 °С выше наружной).
 - Относительная влажность воздуха (40–60%).

- Скорость движения воздуха (0,15–0,25 м/с в жилых, до 0,5 м/с в общественных).
- Температура ограждающих поверхностей.
- 3.2. Световая подсистема.** Оцениваются:
 - Коэффициент естественной освещенности (КЕО) — 0,5% для жилых, 1,0% для общественных, 1,5% для штурманских и радиорубок, 2,0% для рулевых рубок.
 - Уровень искусственной освещенности: 200 лк (общее) и 400 лк (комбинированное) для жилых, 150 лк для кают, 75 лк для коридоров.
 - Показатель дискомфорта и ослепленности.
 - Коэффициент пульсации освещенности.

3.3. Акустическая подсистема. Оцениваются:

- Уровни звукового давления в октавных полосах.
- Уровень звука в дБА.
- Вибрация на рабочих местах и в жилых помещениях.
- Звукоизоляция ограждающих конструкций.

3.4. Эргономическая подсистема. Оцениваются:

- Площадь помещения на одного человека (нормативные значения).
- Объем воздуха на одного человека.
- Высота помещений (не менее 2,0 м при одноярусном, 2,2 м при двухъярусном размещении коек).
- Размеры и расположение коек (2000×800 мм, высота нижней 400 мм, верхней не менее 800 мм от нижней).
- Ширина проходов (не менее 700 мм в одноместных, 800 мм в двухместных, 850 мм в трех-, четырехместных).
- Эргономика мебели и оборудования.
- Зоны досягаемости и маршруты движения.
- Удобство подъема к верхним койкам.

3.5. Санитарно-гигиеническая подсистема. Оцениваются:

- Обеспеченность водоснабжением (горячей и холодной).
- Обеспеченность канализацией.
- Количество санитарно-технических приборов на человека.
- Системы мусороудаления и обработки отходов.
- Системы вентиляции и кондиционирования.
- Чистота и порядок содержания помещений.

3.6. Психофизиологическая подсистема. Оцениваются:

- Цветовое оформление помещений.
- Визуальный комфорт.
- Возможность персонализации пространства.
- Уровень приватности.
- Доступ к информации и связи.
- Условия для отдыха и восстановления.

Блок 4. Критерии и показатели оценки. Модель включает 11 основных количественных критериев (табл. 1).

Блок 5. Методы оценки

5.1. Инструментальные методы

- Измерение параметров микроклимата (термогигрометры, анемометры).
- Измерение освещенности (люксметры).
- Измерение шума и вибрации (шумомеры, виброметры).
- Измерение параметров воздушной среды (газоанализаторы).

5.2. Расчетные методы

- Математическое моделирование микроклимата (CFD-анализ).
- Расчет естественной и искусственной освещенности.
- Акустическое моделирование.
- Расчет эргономических показателей.

5.3. Экспертные методы

- Анкетирование экипажа.
- Интервьюирование.
- Экспертные оценки (метод Дельфи).
- Оценка по шкалам (Лайкерта, семантический дифференциал).

5.4. Сравнительные методы

- Бенчмаркинг с зарубежными аналогами.
- Сопоставление с требованиями НАТО STANAG;
- Сравнение с лучшими отечественными практиками.

5.5. Визуальные методы

- 3D-моделирование помещений.
- Виртуальная реальность (VR) для имитации пребывания в помещениях.
- Визуализация маршрутов движения и зон досягаемости.
- 5.6. Физиологические методы
- Мониторинг качества сна (актиграфия, полисомнография).
- Оценка уровня стресса (кортизол, ЧСС).
- Оценка утомляемости (психомоторные тесты).

Блок 6. Модули оценки

6.1. Модуль «Качество сна». Оценивает условия для полноценного отдыха:

- Комфорт коек и матрацев.
- Уровень шума в ночное время.
- Температура и вентиляция в каютах.
- Освещенность (возможность затемнения).
- Приватность.

6.2. Модуль «Производительность»

Таблица 1

Критерии и показатели оценки

№	Показатель	Нормативное значение
1	Площадь на 1 человека, м ² /чел.	В соответствии с ТТЗ и ВСН
2	Объем воздуха на 1 человека, м ³ /чел.	Не менее нормативного ≥ 2,0 (одноярус), ≥ 2,2 (двухъярус)
3	Коэффициент естественной освещенности (КЕО), м	0,5–2,0 в зависимости от помещения
4	Уровень искусственной освещенности, лк	50–500 в зависимости от помещения
5	Уровень шума, дБА	В соответствии с СанПиН
6	Уровень вибрации, дБ	В соответствии с СанПиН
7	Температура воздуха, °С	16–26 в зависимости от помещения и сезона
8	Относительная влажность %	40–60
9	Скорость движения воздуха, м/с	0,15–0,5
10	Количество санузлов на человека, шт./чел.	В соответствии с нормами
11	Время доступа к помещениям, мин	В соответствии с эргономическими требованиями

Оценивает влияние условий на эффективность труда:

- Эргономика рабочих мест в служебных помещениях.
- Уровень освещенности на рабочих поверхностях.
- Микроклимат в рубках и постах управления.
- Уровень шума и вибрации.
- Удобство доступа к оборудованию.

6.3. Модуль «Здоровье». Оценивает медицинские аспекты:

- Соответствие санитарно-гигиеническим нормам.
- Обеспеченность медицинскими помещениями.
- Качество водоснабжения.
- Условия для личной гигиены.
- Профилактика профзаболеваний.

6.4. Модуль «Психоэмоциональное состояние». Оценивает влияние условий на психику:

- Уровень стресса.
- Усталость и монотонность.
- Социальная изоляция.
- Доступ к информации и развлечениям.
- Возможность общения и отдыха.

6.5. Модуль «Социальная адаптация». Оценивает бытовые условия:

- Качество питания и условия приема пищи.
- Возможности для спорта и физической активности.
- Условия для досуга и самообразования.
- Система связи с родственниками.

6.6. Модуль «Безопасность». Оценивает условия безопасного пребывания:

- Наличие аварийных выходов.
- Удобство эвакуации.
- Противопожарная защита.
- Защита от ионизирующих излучений.
- Электробезопасность.

Блок 7. Интегральная оценка. Интегральный индекс обитаемости (ИИО) рассчитывается по формуле

$$\text{ИИО} = \sum (W_i \times K_i) / \sum W_i,$$

где W_i – весовой коэффициент i -го показателя (определяется экспертным путем); K_i – нормированное значение i -го показателя (отношение фактического значения к нормативному, ограниченное сверху 1,0).

Таблица 2

Весовые коэффициенты (пример)

Подсистема	Весовой коэффициент
Микроклиматическая	0,20
Световая	0,15
Акустическая	0,15
Эргономическая	0,20
Санитарно-гигиеническая	0,15
Психофизиологическая	0,15

Блок 8. Градации уровней обитаемости (табл. 3)

Блок 9. Принятие решений. На основании интегральной оценки и градаций уровней принимаются решения:

9.1. Соответствие требованиям

Уровень	Интервал ИИО	Характеристика
1 – Отлично	ИИО $\geq 0,85$	Условия полностью соответствуют современным требованиям; обеспечивается высокий уровень комфорта и боеспособности
2 – Хорошо	$0,70 \leq \text{ИИО} < 0,85$	Условия в целом удовлетворительны; имеются незначительные недостатки, не влияющие на боеспособность
3 – Удовлетворительно	$0,55 \leq \text{ИИО} < 0,70$	Условия соответствуют минимальным требованиям; имеются недостатки, требующие корректировки
4 – Неудовлетворительно	ИИО $< 0,55$	Условия не соответствуют требованиям; требуется существенная модернизация

- Подтверждение соответствия проектных решений ТТЗ.
- Рекомендация к принятию корабля.
- Выдача положительного заключения.

9.2. Выявление недостатков

- Формирование перечня несоответствий.
- Определение критичности каждого недостатка.
- Ранжирование проблем по степени влияния на обитаемость.

9.3. Приоритетные направления

- Определение наиболее значимых направлений доработки.
- Формирование плана мероприятий.
- Распределение ресурсов.

Блок 10. Рекомендации по совершенствованию

10.1. Архитектурно-планировочные рекомендации

- Оптимизация планировки помещений.
- Увеличение площадей и объемов.
- Улучшение маршрутов движения.
- Рациональное размещение коек и мебели.

10.2. Инженерно-технические рекомендации

- Модернизация систем вентиляции и кондиционирования.
- Улучшение систем освещения.
- Снижение уровней шума и вибрации (звукоизоляция, виброизоляция).
- Модернизация систем водоснабжения и канализации.

10.3. Эргономические рекомендации

- Применение современной мебели с учетом антропометрии.
- Оптимизация зон досягаемости.
- Улучшение условий для работы с оборудованием.
- Применение регулируемых рабочих мест.

10.4. Организационно-управленческие рекомендации

- Оптимизация режимов несения службы.
- Улучшение системы питания.
- Организация досуга и спортивной деятельности.
- Улучшение системы связи с родственниками.

10.5. Санитарно-гигиенические рекомендации

- Усиление контроля за чистотой.
- Улучшение систем дезинфекции.
- Оптимизация режимов проветривания.
- Улучшение условий для личной гигиены.

Блок 11. Выходные данные

11.1. Технический отчет

- Результаты инструментальных измерений.
- Расчеты интегрального индекса обитаемости.
- Анализ соответствия нормативам.
- Перечень выявленных недостатков.
- Рекомендации по совершенствованию.

11.2. Корректировка ТТЗ и проектной документации

- Предложения по изменению тактико-технических характеристик.
- Корректировка планировочных решений.
- Уточнение технических требований к инженерным системам.

11.3. Программа мониторинга условий обитаемости

- План периодических обследований.
- Перечень контролируемых параметров.
- Частота измерений.
- Порядок документирования результатов.

4. МЕХАНИЗМ ОБРАТНОЙ СВЯЗИ

Модель предусматривает замкнутый цикл:

- Сбор данных – анализ – оценка – рекомендации – внедрение – повторный мониторинг.
- Результаты эксплуатации перспективных кораблей направляются на вход модели для корректировки весовых коэффициентов и нормативных значений.
- Накопленный опыт используется при проектировании последующих серий кораблей.

5. ПРИМЕНЕНИЕ МОДЕЛИ В ПРАКТИКЕ ПРОЕКТИРОВАНИЯ

Этап 1. Концептуальное проектирование.

- Определение требований к обитаемости на основе ТТЗ.
- Предварительная оценка архитектурно-планировочных решений.
- Выявление потенциальных проблем.

Этап 2. Техническое проектирование

- Детальная оценка всех подсистем.
- Расчет интегрального индекса.
- Корректировка проектных решений.

Этап 3. Рабочее проектирование

- Проверка соответствия принятым решениям.

- Уточнение спецификаций оборудования.

- Подготовка программы испытаний.

Этап 4. Испытания и приемка

- Инструментальные измерения на построенном корабле.
- Сравнение с проектными значениями.
- Формирование заключения о соответствии.

Этап 5. Эксплуатация

- Периодический мониторинг условий обитаемости.
- Оценка удовлетворенности экипажа.
- Планирование модернизации.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработанная аналитическая модель представляет собой комплексный инструмент для оценки и совершенствования условий обитаемости на перспективных надводных кораблях ВМФ России. Модель:

- основывается на действующих отечественных и международных нормативных документах;
- учитывает специфику военно-морской службы и требования к боевой готовности;
- обеспечивает количественную оценку качества жилых и служебных помещений;
- позволяет выявлять недостатки и формировать обоснованные рекомендации;
- имеет механизм обратной связи для непрерывного совершенствования.

Применение модели на всех стадиях жизненного цикла корабля способствует созданию комфортных и безопасных условий для экипажа, что напрямую влияет на боеспособность корабля и эффективность выполнения поставленных задач.

ЛИТЕРАТУРА

- СанПиН 2.5.2-703–98 Суда внутреннего и смешанного (река-море) плавания. Санитарные правила и нормы.
- СанПиН 2.5.3650–20 Санитарно-эпидемиологические требования к условиям труда работников транспорта.
- ВСН 35–94/Минобороны РФ Общевоинские здания.
- Постановление Главного государственного санитарного врача РФ от 16.10.2020 № 30.
- Нормы искусственного освещения на судах речного флота № 2109-79.
- STANAG 4154 Common Procedures for Seakeeping in the Ship Design Process» (NATO).
- NSTM Chapter 079 — Habitability (U.S. Naval Ships' Technical Manual).
- Методические рекомендации по оценке условий труда на судах.
- Руководство Р.2.2.013–94 Гигиеническая оценка физических факторов среды.
- Юдкина Ю.В. Разработка способов проектного обоснования характеристик малых судов и катеров с учетом факторов обитаемости. Дисс. на соискание степени канд. техн. наук, СПбГМТУ, 2008. ■

К 90-ЛЕТИЮ И.Я. БАСКАКОВА

АО «ЦМКБ «Алмаз»,
контакт. тел. (812) 373 2800, office@almaz-kb.ru



И.Я. Баскаков

30 сентября 2026 г. исполняется 90 лет со дня рождения выдающегося инженера-кораблестроителя и ученого-практика Игоря Яковлевича Баскакова.

Родился он 30 сентября 1936 г. в рабочем поселке Красный Луч Ветлужского района Горьковской области, рано остался без отца, погибшего на фронте в октябре 1941 г.

В 1953 г. юноша закончил Ветлужскую среднюю школу с серебряной медалью, поступил в том же году в Ленинградский кораблестроительный институт, который закончил в 1959 г. с отличием, получив квалификацию инженера-кораблестроителя по специальности «Судостроение и судоремонт».

По окончании института Игорь Яковлевич начинает свою трудовую деятельность в ЦКБ-19 (после объединения с ЦКБ-5 в 1964 г. – ЦМКБ «Алмаз») в отделе экспериментальной гидромеханики, который специализировался на проектировании обводов корпусов быстроходных катеров с подводными крыльями, а также на экспериментальной отработке моделей и крыльевых схем. Ему практически сразу была поручена ответственная работа по отработке обводов корпуса и крылевой схемы модели погружающегося ракетного катера пр. 1231 «Дельфин» на подводных крыльях, который создавался по личному указанию тогдашнего руководителя государства – Генерального секретаря ЦК КПСС Н. С. Хрущёва. Молодой специалист с честью справился с порученной работой, разработанные им теоретические обводы корпуса судов больших водоизмещений и их испытания позволили достичь высокого гидродинамического качества объекта проектирования как на режиме малых скоростей, так и на режиме выхода на крылья. С отставкой Н. С. Хрущёва проект был положен на полку, но отработанная

крыльевая схема с пересекающимися поверхность воды крыльями получила свое воплощение в проекте пассажирского судна на подводных крыльях «Стрела», в создании которого в должности уже ведущего инженера принимал участие и И. Я. Баскаков.

Широко применявшиеся в то время схемы крыльевых устройств с малопогруженными и пересекающимися водную поверхность крыльями показали ограниченные возможности по мореходности, но возникший интерес отечественных и зарубежных судостроителей к глубокопогруженным крыльевым схемам с управляемыми крыльями сулил значительный рост мореходности крылатого объекта, а значит и комфорта пассажиров на борту или размещенного на борту вооружения.



**Опытное судно на АУПК
пр. 1233 «Стрела»**

Создание судов на подводных крыльях на стыке двух стихий требовало разнообразных научных знаний, поэтому Игорь Яковлевич для расширения своих инженерных возможностей в 1962 г. поступает в Северо-Западный политехнический институт на специальность «Автоматика и телемеханика» и заочно заканчивает его в 1968 г. с дипломом с отличием.

В ЦМКБ «Алмаз» проявилось в полной мере полученное им образование инженера-проектировщика-автоматика-телемеханика в исследованиях и экспериментах по созданию катеров и кораблей с глубокопогруженными автоматически управляемыми подводными крыльями (АУПК). В 1965 г. И. Я. Баскакова переводят в сектор главного конструктора В. М. Бурлакова, где разрабатывалось первое отечественное пассажирское судно с АУПК пр. 1233 «Тайфун».

С 1971 г. Игорь Яковлевич являлся заместителем главного конструктора и занимался как созданием, так и опытной эксплуатацией первых в стране судов и катеров с АУПК пр. 1233 и 1240.

В 1978 г. он защищает кандидатскую диссертацию на тему, свя-



МРК пр. 1240 «Ураган» на крыльях

занную с его основной деятельностью. В 1981 г. Игоря Яковлевича назначают начальником проектного отдела ЦМКБ «Алмаз», где под его руководством в проектно-компоновочные решения кораблей и катеров, создавших имя бюро: проекты 10410, 206МР, 12061, 12322, 1239, 12411, 12441.

Обладая педагогическим талантом, Игорь Яковлевич воспитал целую плеяду инженеров, обеспечивших создание отечественных скоростных катеров и кораблей.

После смены руководства ЦМКБ «Алмаз» в 1991 г. не чуждый всему новому Игорь Яковлевич находит свежее приложение своей кипучей энергии, продолжив работы в области гражданского скоростного судостроения в малом государственном предприятии «Галс» при МЗ «Алмаз» и КПИФ «Инкона».

С выходом на пенсию Игорь Яковлевич не оставил судостроение. Возглавив музей АО «СФ «Алмаз», он посвятил всего себя сохранению и популяризации истории родного «Алмаза», возрождению забытых имен и событий. Так, на основе архивных документов им была воссоздана реальная история создания сторожевых катеров МО-2 и МО-4, принимавших активное участие в Великой Отечественной войне, и восстановлены добрые имена главного инженера верфи НКВД В. Е. Бурачека и главного конструктора сторожевого катера МО-4 С. В. Пуговко, написаны многочисленные биографические очерки о выдающихся деятелях отечественного судостроения и многое другое. В соавторстве и самостоятельно И. Я. Баскаковым написаны фундаментальные работы по истории ЦМКБ «Алмаз», СФ «Алмаз», МЗ «Алмаз».

Коллектив АО «ЦМКБ «Алмаз» поздравляет Игоря Яковлевича с юбилеем, желает ему здоровья, бодрости и жизненных сил. ■

Сварка – технологический процесс создания неразъемных металлических соединений посредством установления межатомных связей при нагреве и пластическом деформировании материала [1]. Преимущества сварных соединений заключаются в их высокой прочности, надежности и герметичности. Сварка широко применяется в промышленности, особенно в судостроении.

Две трети всего производимого российского металлопроката используется для изготовления сварных конструкций. Сварочные процессы занимают половину всех производственных работ по объему конечного продукта [2].

На сам процесс сварки приходится лишь пятая часть общих трудовых затрат при производстве сварных конструкций [3], что подчеркивает важность оптимизации не только непосредственно процесса сварки, но и подготовительных операций.

В данной работе рассматривается метод оптимизации процесса сборки сварных конструкций путем уменьшения трудовых затрат на выполнение подготовительных операций перед окончательной сваркой за счет применения в конструкции соединений типа «шип-паз» при работе с коробчатыми конструкциями из листового проката.

КОНСТРУКТИВНЫЕ ВИДЫ СОЕДИНЕНИЙ ТИПА «ШИП-ПАЗ»

Соединение «шип-паз» – это метод, при котором листовые детали предварительно скрепляются за счет того, что фигурные выступы (шпы) входят в отверстия (пазы), а затем дополнительно фиксируются с помощью сварки, резьбовым соединением или за счет деформации шипа.

При соединении типа «шип-паз» с фиксацией «пробковым» сварным швом (рис. 1, а) сварка выполняется только в

ОПТИМИЗАЦИЯ ПРОЦЕССА СБОРКИ СВАРНЫХ КОНСТРУКЦИЙ С ПРИМЕНЕНИЕМ СОЕДИНЕНИЙ ТИПА «ШИП-ПАЗ»

В.Ю. Лисин, инженер-конструктор 1-й категории,
А.В. Жевлаков, инженер-конструктор 1-й категории,
АО «СПМБМ «Малахит»,
контакт. тел. +7(952) 383 8685, +7(953) 354 8699

районе шипа (рис. 2), благодаря чему термические деформации минимальны, а прочность и жесткость подобного соединения сопоставима с экструдированным профилем аналогичного сечения из того же материала [4].

При соединении типа «шип-паз» с фиксацией тавровым сварным швом (рис. 1, б) шов может быть как непрерывным, так и прерывистым, в зависимости от требований к конечной конструкции.

Соединение, основанное на изгибе или другой деформации шипа (рис. 1, в), не требует дополнительных крепежных элементов и сварочных работ. Этот вариант может применяться для сборки конструкций, к которым не предъявляется требований к высокой прочности и жесткости.

Более надежным (по сравнению с соединением, основанном на изгибе шипа) является соединение типа «шип-паз» с фиксацией болтовым соединением (рис. 1, г). Данное соединение может быть применено для изготовления различных сборно-разборных конструкций.

Для выполнения раскроя деталей с элементами соединения «шип-паз» применяются станки с числовым программным управлением (ЧПУ) для лазерной, водоструйной или плазменной резки. Современные станки лазерной резки, производимые в Российской Федерации, обладают высокой точностью позиционирования по всем осям до $\pm 0,03$ мм [6].

ПРОФИЛЬ И РАЗМЕРЫ СВАРНОГО СОЕДИНЕНИЯ «ШИП-ПАЗ»

Форма элементов соединения «шип-паз» должна обеспечивать:

- легкость сборки с минимальной подгонкой по месту или полностью без нее;
- предварительную фиксацию конструкции с минимальными люфтами;
- возможность изготовления профиля шипов и пазов за один проход с минимальной последующей обработкой или полностью без нее;
- отсутствие концентраторов напряжений и других элементов, снижающих прочность конечной сварной конструкции.

Для соединения типа «шип-паз» с фиксацией «пробковым» сварным швом, длина шипа b (рис. 3) обычно принимается равной ширине шипа a (псевдоквадратный профиль).

Профиль паза ($g \times h$) определяется размерами шипа ($a \times b$) с гарантированным зазором $0,1...0,2$ мм ($g = a + 0,1...0,2$ мм, $h = b + 0,1...0,2$ мм). Также зазор зависит от точности станка ($\approx 0,1$ мм) и обеспечивает собираемость конструкции.

Высота шипа s зависит от марки материала и может быть как меньше глубины паза d , равняться ей, так и быть больше глубины. Существуют следующие рекомендации для высоты шипа,

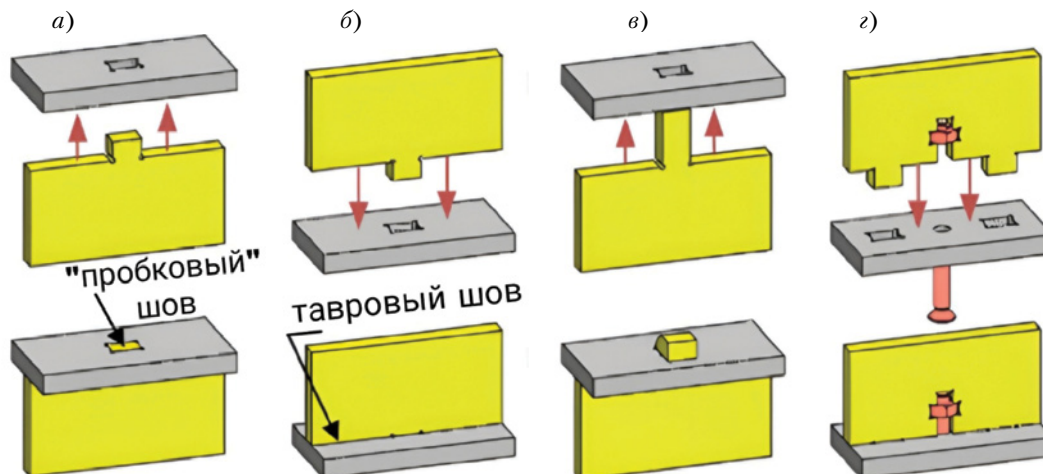


Рис. 1. Соединение типа «шип-паз»: а – с фиксацией «пробковым» сварным швом; б – с фиксацией тавровым сварным швом; в – с фиксацией за счет деформации шипа; г – с фиксацией болтовым соединением

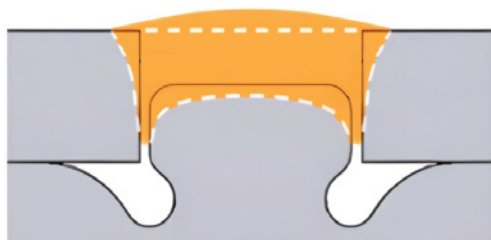


Рис. 2. Поперечное сечение «пробкового» сварного соединения

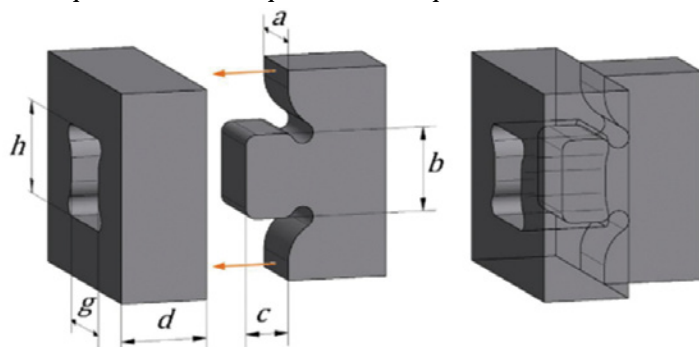


Рис. 3. Размеры элементов соединения типа «шип-паз» с фиксацией «пробковым» сварным швом

основанные на теоретических и практических изысканиях [4]:

- для алюминиевых сплавов наиболее оптимальным является шип, выступающий на 1...2 мм ($c = d + 1...2$ мм) над уровнем паза;
- для стали наиболее оптимальным является шип, находящийся на уровне паза ($c = d$), или ниже на не более 0,5 мм ($c = d - 0,5$ мм).

Для соединения типа «шип-паз» с фиксацией тавровым сварным швом размеры профиля шипа определяются исходя из толщины свариваемых деталей, размеров сварной конструкции, требований по точности и т. д.

Форма угловых кромок шипов и пазов влияет на собираемость конструкции, а также может быть концентратором напряжений. Поэтому рекомендуется выполнять минимальные скругления на угловых кромках.

Шаг расположения шипов и пазов в соединении конструкции определяют, исходя из толщины свариваемых деталей, размеров сварной конструкции, требований по точности и т. д. В работе [4] для соединения типа «шип-паз» с фиксацией «пробковым» сварным швом предложен шаг 30...100 мм.

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ СБОРКИ СВАРНОЙ КОНСТРУКЦИИ

Проведем сравнительный анализ технологических процессов изготовления заготовки сварной конструкции, полученной методом традиционной сборки деталей (*Вариант 1*) и сборки с применением соединения типа «шип-паз» (*Вариант 2*) в части оценки затрачиваемого времени на выполнение подготовительных работ перед сваркой (см. таблицу).

За пример конструкции для анализа возьмем заготовку сварного кронштейна, представляющего собой малонагруженную корабчатую конструкцию из шести деталей из листового проката разной толщины (рис. 4).

Внешний вид доработанного кронштейна после введения в детали элементов соединений типа «шип-паз» представлен на рис. 5. Упрощенно технологический процесс изготовления заготовки сварной конструкции кронштейна включает в себя основные технологические операции, перечисленные в таблице.

Для данной конструкции при выполнении расчета будем принимать, что объ-



Рис. 4. Сварной кронштейн с классической сборкой

ем и типы сварных швов при изготовлении заготовки кронштейна по двум вариантам не изменятся. При этом, исходя из условий нагружения кронштейна, требуемой прочности и условий его эксплуатации, можно оптимизировать сварные швы с целью уменьшения трудоемкости непосредственно выполнения сварных операций. Например, сварку деталей заготовки можно выполнять только в местах соединений шип-паз пробковым швом, а не сплошными швами вдоль всех кромок свариваемых деталей (см. рис. 1, а).

Проведем оценочный расчет времени выполнения каждой операции.

1. Время резки заготовок деталей на специализированном станке [6, 7]

$$T_B = \frac{t_{\text{вно}} + \frac{l_{\text{рез}}}{v_{\text{рез}}} + n_{\text{вр}} \times t_{\text{вр}}}{60}, \quad (1)$$

где $T_B = 0,93$ мин – время вспомогательных операций; $l_{\text{рез}}$ – общая длина резки: для *Варианта 1* – 2,1 м, для *Варианта 2* – 2,7 м; $v_{\text{рез}} = 1,5$ м/мин – средняя скорость лазерной резки; $n_{\text{вр}}$ – количество врезок (начальных точек резки): для *Варианта 1* – 6; для *Варианта 2* – 11; $t_{\text{вр}} = 0,01$ мин – время на одну врезку.

Итого: время резки заготовок деталей на станке составляет: для *Варианта 1* – 0,04 ч; для *Варианта 2* – 0,05 ч.

2. Время подготовки (зачистки) мест сварных швов и прилегающих поверхностей [8] одинаковое для обоих вариантов:

$$T_{\text{под.шв}} = \frac{l_r \times t_r + l_b \times t_b}{60}, \quad (2)$$

где $l_r = 0,416$ м – длина стыка горизонтальных кромок; $t_r = 0,972$ мин – вре-



Рис. 5. Сварной кронштейн с применением соединений типа «шип-паз»

Таблица

Технологические операции	
Вариант 1	Вариант 2
1. Резка на специализированном станке	1. Резка на специализированном станке
2. Подготовка (зачистка) мест сварных швов и прилегающих поверхностей	2. Подготовка (зачистка) мест сварных швов и прилегающих поверхностей
3. Установка и сборка на универсально-сборном приспособлении (УСП);	3. Установка и сборка на рабочем месте сварщика и выполнение сварки
4. Выполнение и контроль прихваток	4. Выполнение сварки
5. Снятие с УСП	5. Контроль сварки
6. Установка на рабочем месте сварщика	6. Снятие сварочных напряжений
7. Выполнение сварки	
8. Контроль сварки	
9. Снятие сварочных напряжений	

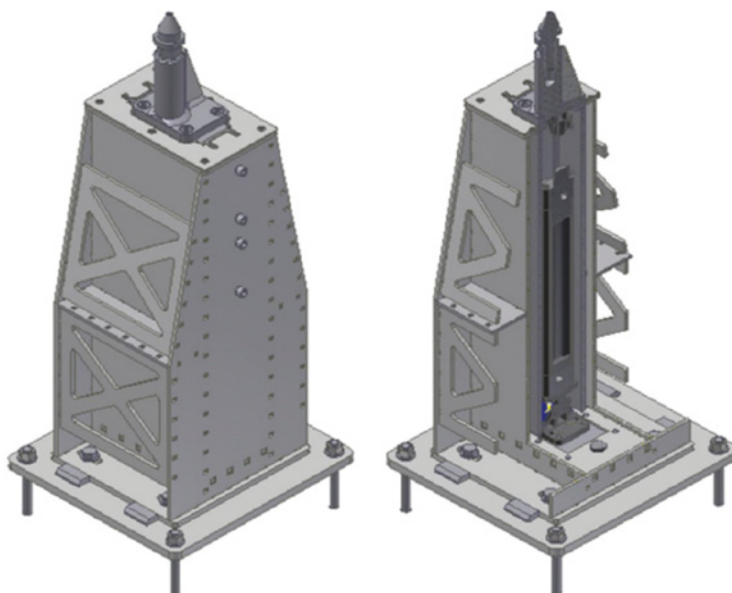


Рис. 6. Фундамент выдвижного штифта системы RPS

мя на подготовку 1 м горизонтальной кромки; $l_b = 0,188$ м – длина стыка вертикальных кромок; $t_b = 1,15$ мин – время на подготовку 1 м вертикальной кромки.

Итого: время подготовки мест сварных швов и прилегающих поверхностей составляет 0,01 ч.

3. Время установки (сборки) на УСП, выполнение прихваток, снятие с УСП для *Варианта 1* [9]

$$T_{УСП} = 0,0158 \times Q^{0,26} \times n^{0,71} \times L^{0,18} + \frac{n_{вз} \times T_{вз}}{60} + \frac{n_{сз} \times T_{сз}}{60}, \quad (3)$$

где $Q = 4,2$ кг – масса конструкции; $n = 6$ – количество деталей; $L = 0,964$ м – длина стыков; $T_{вз} = 0,35$ мин – время на закрепление в винтовом зажиме; $n_{вз} = 8$ – количество используемых зажимов; $T_{сз} = 0,65$ мин – время на закрепление съемной струбиной; $n_{сз} = 2$ – количество используемых съемных струбин.

Итого: время установки (сборки) на УСПУ, снятие с УСП составляет 0,149 ч.

4. Время установки на рабочем месте сварщика, выполнения сварки для *Варианта 1* [8, 9]:

$$T_{СВВар1} = \frac{T_{уст} + T_{шт} \times L \times K_3 \times K_{тп}}{60}, \quad (4)$$

где $T_{уст} = 0,32$ мин – время установки; $T_{шт} = 5,4$ мин – штучное время на свариваемый стык на 1 пог. м шва; $L = 0,964$ м – длина сварных швов; $K_3 = 1,25$ – поправочный коэффициент на условия работы; $K_{тп} = 1$ – поправочный коэффициент, учитывающий тип производства.

Итого: время установки на рабочем месте сварщика и выполнения сварки для *Варианта 1* составляет 0,114 ч.

5. Время установки и сборки на рабочем месте сварщика, выполнения сварки для *Варианта 2* [8, 9]

$$T_{СВВар2} = \frac{T_{уст} + T_{сбор} + T_{шт} \times L \times K_3 \times K_{тп}}{60}, \quad (5)$$

где $T_{сбор} = 0,56$ мин – время сборки на «шип-паз» перед сваркой.

Итого: время установки и сборки на рабочем месте сварщика, выполнения сварки для *Варианта 2* составляет 0,123 ч.

Время снятия сварочных напряжений одинаково для обоих вариантов (данное время в оценочном расчете не учитывалось).

Таким образом, время, затрачиваемое на выполнение подготовительных операций перед сваркой сварной конструкции кронштейна, составляет: по *Варианту 1* – 0,313 ч; по *Варианту 2* – 0,183 ч.

Проанализировав полученные результаты, получаем, что время выполнения подготовительных операций перед сварочными операциями в сумме со временем выполнения окончательной сварки заготовки уменьшится примерно на 50–60%. При этом также отпадает необходимость в использовании УСП.

ПРИМЕР КОНСТРУКЦИЙ С СОЕДИНЕНИЕМ «ШИП-ПАЗ»

В качестве реализованного примера конструкции с использованием соединений типа «шип-паз» представлен фундамент для механизма выдвижного штифта (рис. 6), созданный для завода Skoda Auto a.s. в Квасинах (Чехия). Фундамент представляет собой коробчатую раму, сваренную из стальных листов различной толщины. В данной конструкции применялось соединение «шип-паз» с фиксацией «пробковым» швом (см. рис. 1, а)

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Применение соединения типа «шип-паз» оптимизирует процесс сборки сварных конструкций за счет уменьшения времени подготовительных работ и минимизации использования вспомогательной (технологической) оснастки.

Благодаря этому конструкции с соединением «шип-паз» приобретают

широкое распространение в промышленности. Однако на настоящий момент данная технология не стандартизирована, что несколько затормаживает ее внедрение, в том числе в судостроительной отрасли, в частности для изготовления изделий МСЧ. Для применения данной технологии в отрасли необходима разработка стандартных размеров элементов соединения «шип-паз» и рекомендаций по его применению.

ЛИТЕРАТУРА

- ГОСТ 2601–84. Сварка металлов. Термины и определения основных понятий. – М.: ИПК Изд-во стандартов, 1984.
- Парлашкевич В.С. Сварка сегодня // Ритм машиностроения. – 2016. – № 7.
- Патон Б.Е. Комплексная механизация – важнейший фактор ускорения технического прогресса в производстве сварных конструкций // Автоматическая сварка – 1974. – № 7.
- Experimental optimization of tab and slot plug welding method suitable for unique lightweight frame structures/ Stary Michal, Novotny Frantisek, Horak Marcel, Stará Marie, Vit Zdenek // Journal of Manufacturing Processes. – 2018. – Vol.31. – P.453–467.
- Darin C. Russell. Self-Fixturing Architecture. – University of Nebraska: Lincoln Spring. – 2012. – Vol.5. – P.4.
- <https://unimach.ru/>.
- Общемашиностроительные нормативы времени и режимов резания для нормирования работ, выполняемых на универсальных и многоцелевых станках с ЧПУ. – М., 1990.
- Общемашиностроительные нормативы времени на слесарно-сборочные работы при сборке металлоконструкций под сварку. – М., 1982.
- Межотраслевые нормативы времени на ручную дуговую сварку. – М., 1990.
- Общемашиностроительные нормативы времени на слесарную обработку деталей и слесарно-сборочные работы по сборке машин и приборов в условиях массового, крупносерийного и среднесерийного типов производства. – М., 1990. ■

В современных условиях машиностроительные предприятия сталкиваются с необходимостью постоянного обновления номенклатуры изделий и сокращения сроков их выпуска [1, 2]. Слабым местом является этап технологической подготовки производства (ТПП), в частности, проектирование технологических процессов и разработка маршрутных карт.

Существующие системы автоматизации (CAD/CAM) часто ориентированы на детальное проектирование операций, например, на создание управляющих программ для станков с числовым программным управлением, но не решают задачу сквозной автоматизации формирования собственно технологического маршрута (последовательности цехов, операций и переходов) [3,4]. Технолог вынужден вручную выполнять следующие операции [5]:

- выбирать типовой маршрут из аналогичных деталей;
- корректировать его с учетом изменений;
- подбирать оборудование и оснастку;
- разрабатывать технически обоснованные нормы времени.

Это приводит к высоким временным затратам, нетехнологичным решениям и низкой скорости адаптации к изменениям [6].

Существующие CAPP-системы (англ. Computer-Aided Process Planning) часто жестко детерминированы и требуют сложной настройки либо, наоборот, являются лишь электронными справочниками. Отсутствует гибкая связь между конструкторской информацией (конструкторская документация) и технологическими ресурсами (станки, управляющие программы), что не позволяет разрабатывать маршрутные карты по формальным правилам.

Цель данной работы – разработка методики и принципиальной модели данных для автоматизированного формирования технологических маршрутов изготовления деталей в условиях машиностроительной части, позволяющей существенно сократить трудоемкость ТПП за счет использования семантического описания предметной области.

Реализация подхода включает системный анализ и построение логической модели данных предметной области, разработку алгоритма автоматического формирования технологического маршрута по конструктивным признакам изделия и верификацию методики на примерах готовых изделий, а также проектирование процессов для типовых и деталей, изготавливаемых впервые.

РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ФОРМИРОВАНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ МАРШРУТОВ ДЛЯ ИЗДЕЛИЙ МАШИНОСТРОИТЕЛЬНОГО ПРОИЗВОДСТВА

Д. О. Глазырина, канд. техн. наук, доцент,

и.о. зав. кафедрой Ядерной техники и теплофизики,

Е. Н. Алексин, канд. техн. наук, доцент,

Л. В. Гуква, ассистент,

Г. В. Николаев, аспирант, СПбГМТУ,

контакт. тел. +7 (911) 785 3828,

d_glazyrina@bk.ru, aleksinevg@yandex.ru, lilguv03@gmail.com,

Saintsante@yandex.ru

На текущий момент рынок предлагает ряд программных комплексов, призванных автоматизировать и упростить работу технолога-проектировщика. Среди них можно выделить как отечественные разработки, например, специализированный продукт «TechnologiCS» (ЗАО «СиСофт Девелопмент», Россия) [7], так и зарубежные аналоги, такие как Upchain (Autodesk) и Aras Innovator [8, 9]. Данные системы обеспечивают поддержку основных функций управления технологическими данными (PLM-подход), однако их анализ позволяет выявить перспективные направления для совершенствования, актуальные развития отечественных решений:

- повышение степени автономности и сквозной интеграции. Существующие системы, включая TechnologiCS [7], зачастую используют сторонние табличные процессоры (например, Microsoft Excel) для генерации отчетных форм, что может приводить к необходимости ручного переноса данных и к рискам несогласованности. Целесообразна реализация встроенного механизма формирования регламентированных документов (маршрутных и операционных карт) на основе единой базы знаний, исключаяющей промежуточные ручные операции;
- оптимизация пользовательского интерфейса. Снижение нагрузки на пользователя за счет контекстно-зависимого интерфейса, эргономичной визуализации технологических графов и применения принципов wizard-based (пошагового) проектирования для типовых задач;
- разработка гибкой модели лицензирования. Внедрение модульной

архитектуры и подписки для снижения порога входа для малых и средних предприятий, а также предоставление полнофункциональной демонстрационной версии с ограничением по времени или объему обрабатываемых данных для оценки возможностей системы;

- развитие функционала интеллектуальной автоматизации. Ключевым улучшением является углубление уровня автоматизации непосредственно процесса проектирования ТП, а не только его документирования. Это подразумевает реализацию алгоритмов, аналогичных предложенному в работе, для автоматического синтеза последовательности операций, выбора ресурсов и расчета режимов на основе формализованной модели изделия и производственных ограничений.

Ядром системы является централизованная информационная база данных (БД), выступающая хранилищем всех необходимых для проектирования знаний и нормативов. Ее структура позволяет системе быть инвариантной к конкретному производству – адаптация под условия завода происходит путем настройки и пополнения БД. В состав БД входят следующие взаимосвязанные справочники:

- Справочник материалов и заготовок, который содержит механические свойства материалов (твердость, предел прочности, текучести), стандартные характеристики и типы заготовок (поковки, отливки, прокат), их габаритные размеры.
- Справочник технологического оборудования, который включает де-

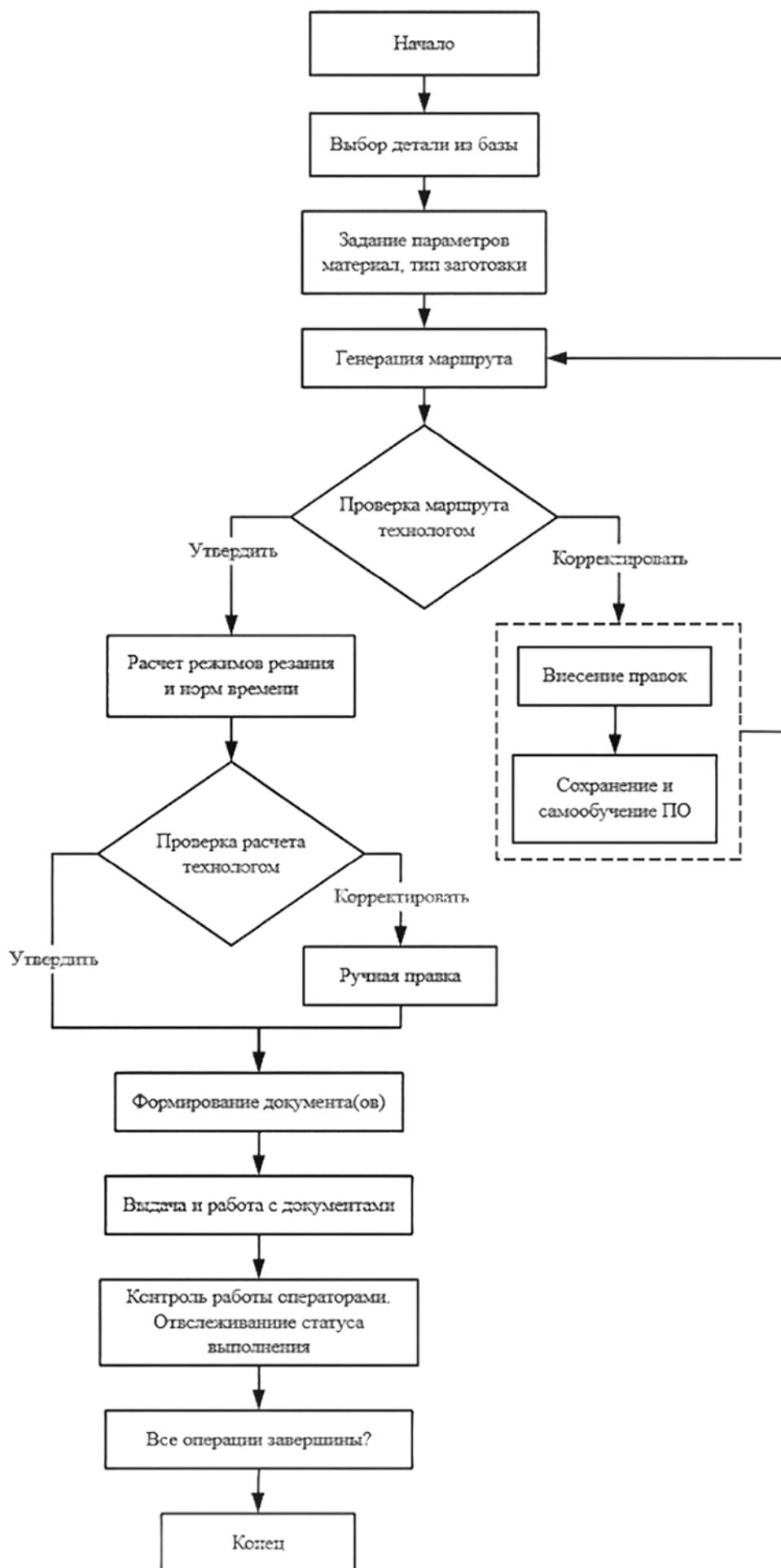


Рис. 1. Схема работы программы для автоматизированного проектирования технологических процессов

тализированные характеристики станков (токарных, фрезерных, сверлильных): мощность на шпинделе, диапазон и количество скоростей и подач, класс точности, габариты обрабатываемой заготовки, наличие ЧПУ.

- Справочник режущего и вспомогательного инструмента, который содержит параметры инструментов (фрез, резцов, сверл, метчиков), включая геометрию, материал режущей части, стойкость.
- Справочник технологической оснастки (приспособлений), который описывает типы и характеристики станочных приспособлений (патронов, планшайб, кондукторов).
- Библиотека типовых технологических решений и маршрутов, которая содержит формализованные алгоритмы выбора операций, оборудования и оснастки, а также шаблоны (обобщенные маршруты) для групп деталей, обладающих общими конструктивно-технологическими признаками.

Для управления и актуализации контентной БД без необходимости обращения к разработчикам ПО предлагается использовать открытую структуру БД, в которую пользователи (инженеры) смогут вносить нужную информацию или корректировать уже имеющуюся.

В данной программе предлагается использовать ориентированный ациклический граф. В таком исполнении технологический процесс представляет собой строгую последовательность действий, где каждая последующая операция зависит от результатов предыдущей. В этой модели узлы (вершины) графа соответствуют сущностям, а направленные ребра – отношениям между ними. Отсутствие циклов гарантирует логическую целостность и выполнимость спроектированного процесса.

Данное ПО служит для автоматизированного проектирования технологических процессов и контроля их исполнения. Логика работы программы наглядно представлена в виде структурной схемы (рис. 1)

Работа начинается с конструктора, который создает модель будущей детали и задает ей необходимые свойства, например, материал, формы поверхностей и т. д. После технолог опреде-

ляет необходимую заготовку с ее припусками, механическими свойствами. Затем система автоматически генерирует предложение по технологическому маршруту – последовательности операций для изготовления. Технолог проверяет этот маршрут, вносит при необходимости правки, которые программа запоминает для улучшения будущих рекомендаций, и утверждает окончательный вариант.

Далее программа рассчитывает детальные режимы резания и нормы времени для каждой операции. Технолог снова проверяет и при необходимости корректирует эти расчеты. После полного согласования система формирует готовый пакет технологических документов, которые передаются на производство.

На этапе исполнения ответственные рабочие или операторы отмечают в системе выполнение каждой операции, что позволяет в реальном времени отслеживать статус изготовления детали. Процесс считается завершенным, когда выполнены все операции утвержденного маршрута.

Предложенная методика и программная реализация на основе семантической модели данных и ориентированного ациклического графа позволяют перейти от фрагментарной автоматизации отдельных задач ТПП к сквозному интеллектуальному проектированию технологических маршрутов. Это сокращает временные затраты, снижает субъективность решений и повышает адаптивность производства к изменениям номенклатуры. В перспективе развитие системы связано с углублением интеграции с CAD- и ERP-системами, внедрением методов машинного обучения для оптимизации маршрутов и режимов, а также созданием облачных решений с гибкой моделью лицензирования для предприятий любого масштаба.

В статье рассмотрена и предложена методика автоматизированного формирования технологических маршрутов, основанная на семантической модели предметной области и представлении технологического процесса в виде ориентированного ациклического графа. Разработана логическая структура базы данных, которая включает справочники материалов,

оборудования, инструмента, оснастки и типовых технологических решений, что обеспечивает адаптацию системы к условиям конкретного производства.

Реализация предложенного подхода позволяет сократить трудоемкость проектирования технологических процессов, повысить согласованность данных и создать предпосылки для интеграции с ERP- и MES-системами в рамках цифровизации производственного цикла.

ЛИТЕРАТУРА

1. Модернизация производства: что это такое – цели, проекты и программы для улучшения производственных процессов и технологий. – [Электронный ресурс]. URL: <https://www.cleverence.ru/articles/biznes/modernizatsiya-proizvodstva-chto-eto-takoe-tseli-programmy-dlya-uluchsheniya/> (дата обращения: 12.10.2023).
2. Как организовать проект цифровой трансформации на машиностроительном предприятии. – [Электронный ресурс]. URL: <https://ecosystem-cosmos.ru/mediacenter/News/157d2a39-6520-44b6-b266-e292842dce8f> (дата обращения: 12.10.2023).
3. Центр компетенций ОЦО: официальный сайт. – [Электронный ресурс]. URL: <https://ssc-pro.ru/> (дата обращения: 12.10.2023).
4. Муленко В. В. Компьютерные технологии и автоматизированные системы в машиностроении: Учеб. пособие для вузов. – М.: Российский государственный университет нефти и газа (Национальный исследовательский университет) им. И. М. Губкина, 2015. – 73 с. – EDN MVANDY.
5. Квалификационный справочник должностей руководителей, специалистов и других служащих (утв. Постановлением Минтруда России от 21.08.1998 № 37) (ред. от 27.03.2018).
6. Беззуб А. В., Чилингаров К. А. «Старый новый» метод автоматизации проектирования техпроцессов // Машиностроение. – 2006. – № 3 (33). – С. 37–45.
7. Официальный сайт и техническая документация системы TechnologiCS/ЗАО «СиСофт Девелопмент». – URL: <https://technologies.ru/> (дата обращения: 12.10.2023).
8. Autodesk Upchain: Product Overview/Autodesk Inc. – URL: <https://www.autodesk.com/products/upchain/overview> (дата обращения: 12.10.2023).
9. Aras Innovator Platform / Aras Corp. – URL: <https://www.aras.com/en/platform/innovator> (дата обращения: 12.10.2023). ■

Вентиляционные установки (ВУ) – одни из самых многочисленных электроприводов на судах и в цехах судоремонтных заводов. От исправности их работы зависит обитаемость, безопасность персонала судна и технологические процессы в цехе. Вибрация, возбуждаемая вентилятором, является одной из его важнейших характеристик. Повышение вибрации может свидетельствовать об ухудшении его технического состояния. Нормативные документы устанавливают предельные значения вибрации и для промышленных, и для судовых ВУ [1, 3]. Система технического обслуживания, включающая методы вибрационной диагностики и виброналадки, позволяет увеличить срок службы ВУ.

В производственных цехах АО «Северное производственное объединение «Арктика» (г. Северодвинск) эксплуатируются сотни ВУ. В рамках проекта производственной системы были применены методы вибрационной диагностики и виброналадки, позволившие оценить техническое состояние ВУ и довести уровни вибрации до требуемых значений. В рамках проекта разработаны:

- инструкция «Эксплуатация, техническое обслуживание и ремонт вентиляционных систем подразделений», предусматривающая контроль вибрации в процессе эксплуатации, до и после ремонта ВУ [13];
- методика «Измерение и контроль вибрации промышленных вентиляционных установок», устанавливающая порядок измерения и контроля вибрации ВУ [14];
- инструкция «Наладка вентиляционных установок», определяющая порядок и способы наладки ВУ [15];
- программа обучения обслуживающего персонала «Измерение, контроль вибрации и наладка вентиляционных установок» [16] в объеме 80 часов, большая часть которой приходится на практические занятия по контролю вибрации и наладке вентиляционных установок.

В ходе работы были проведены измерение вибраций и виброналадка более 50 единиц оборудования, а также обучение работников служб механика-энергетика методам контроля вибрации, оценки технического состояния, вибрационной диагностики дефектов и наладке ВУ.

МАТЕРИАЛЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Наладка радиальных вентиляторов. Процедура наладки радиальных вентиляторов начинается с проверки данных формуляров на ВУ и сравнение с фактическими значениями. Параметры радиальных вентиляторов определяются [4,

5, 14, 15]. Для проведения балансировки радиальных ВУ под критерии стандарта [1] определена категория вентиляторов для технологических процессов (BV-3) и предельные значения вибрации ВУ (табл. 1). Признаки дефектов радиальных центробежных вентиляторов в спектре вибрации, которые ограничивают качество балансировки, взяты из [2] и приведены в табл. 2. Точки измерения вибрации на радиальном центробежном вентиляторе указаны на рис. 1.

Особенностью вибрационной наладки радиальных центробежных ВУ, имеющих износ является наличие осевой вибрации, величина которой может превышать радиальную. Причин этого может быть несколько. Основной признак дефекта лопатки рабочего колеса вентилятора – рост осевой вибрации на частоте его вращения. Дефект лопатки меняет ее производительность и радиальную силу с частотой вращения, выталкивающую поток (аэродинамическая неоднородность потока). Поток в вентиляторе меняет направление с осевого на входе к радиальному на выходе; переменная сила давления от пульсаций потока тоже меняет направление. Такой осевой толчок и является основным признаком дефекта

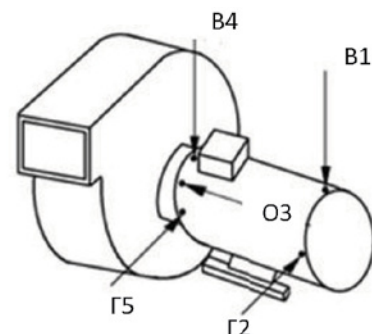


Рис. 1. Эскиз точек установки вибродатчика на радиальном центробежном вентиляторе

лопатки, при котором механической неуравновешенности может и не быть (при деформации лопатки).

Осевая вибрация появляется и у рабочих колес без дефектов лопаток. Из-за смещения оси рабочего колеса относительно оси подшипников (биение рабочего колеса) производительность лопаток с одной стороны колеса больше, чем с другой. Осевая вибрация без дефектов рабочего колеса может появиться и из-за дефекта муфты (при ее наличии).

При балансировке радиальных ВУ часто растет его осевая вибрация на частоте вращения. В процессе балансировки ротора с рабочим колесом от вели-

Рекомендуемые предельные значения вибрации по ГОСТ 31350–2007 (категория BV-3)

Вибрационное состояние вентилятора	Предельное СКЗ виброскорости, мм/с	
	жесткая опора	податливая опора
Пуск в эксплуатацию	4,5	6,3
Предупреждение	7,1	11,8
Останов	9,0	12,5

Таблица 2

Признаки дефектов радиальных центробежных ВУ по ГОСТ 13373-5–2022

Вид дефекта радиальных центробежных ВУ	Характерные частотные составляющие в узкополосном спектре вибрации	
	основные	дополнительные
Неуравновешенность рабочего колеса	$f_{вр}$	Нет роста $kf_{вр}$
Биение рабочего колеса	$kf_{вр}$	–
Дефекты узлов крепления	$f < 0,5 f_{вр}$	–
Дефекты лопастей	$kf_{вр}$	$kf_n, k_1f_n \pm k_2f_{вр}$
Аэродинамическая неоднородность потока	kf_n	–

Здесь $f_{вр}$ – частота вращения ротора, f_n – частота вращения лопасти рабочего колеса вентилятора, k, k_1, k_2 – натуральные числа.

чины массы, устанавливаемой на ротор (колесо), при наличии зазора в подшипниках меняется величина боя рабочего колеса, а следовательно, и осевая вибрация. В таких случаях балансировкой иногда можно уменьшить осевую вибрацию, добавив осевое направление в программу балансировки.

Пример наладки радиальной ВУ. Тип ВУ – ВЦ14-46-4, тип электродвигателя – АДМ100L4Y2 (4 кВт). Для проведения измерений и балансировки использовался виброанализатор СД-21 с программами DREAM и Vibro-12.

После первоначального измерения общего уровня вибрации и узкополосного спектра (табл. 3 и рис. 2) был проведен осмотр ВУ, не выявивший дефектов ВУ, рамы и креплений. Принято решение о балансировке, которая позволила значительно уменьшить уровень вибрации (см. табл. 3 и рис. 3). Снижение нагрузки на подшипники после балансировки [11,12] подтверждается уменьшением глубины модуляции высокочастотного сигнала, отражающим признаки дефектов подшипников, что зафиксировано в отчете программы DREAM. На рис. 4 отображены признаки дефектов подшипника (модуляции в спектре огибающей) до балансировки: неоднородный радиальный натяг – 9%, раковины на наружном кольце – 7%, износ внутреннего кольца – 9%; на рис. 5 – признаки дефектов подшипника после балансировки: износ внутреннего кольца – 9%, раковины, сколы на телах качения – 4%.

Таблица 3
Уровни СКЗ виброскорости ВУ типа ВЦ14-46-4 до и после балансировки

№ точки	СКЗ виброскорости, мм/с	
	до балансировки	после балансировки
В1	4,8	1,6
Г2	3,1	2,3
О3	1,1	2,6
В4	3,7	1,7
Г5	3,2	0,8

Составляющие на частоте 3 Гц для радиальных ВУ обусловлены резонансом вентилятора на виброизоляторах, возбуждаемым пульсациями в потоке воздуха.

После проведения работ было выдан протокол измерений с рекомендациями по обслуживанию.

Виброналадка ВУ с клиноременной передачей. Требования ВУ с клиноременной передачей определены в [6–10]. Признаки дефектов ВУ с клиноременной передачей представлены в табл. 4.

Вибрационная диагностика и вибративная наладка ВУ с клиноременной передачей, имеющая значительный износ, имеет следующие особенности:

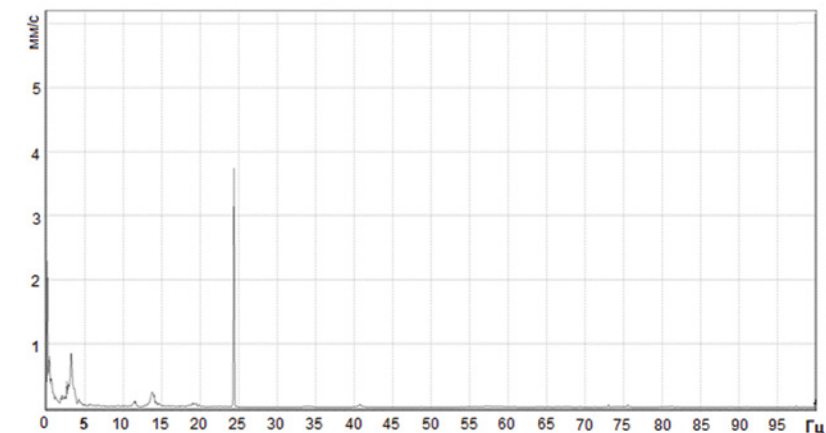


Рис. 2. Повышенная вибрация на оборотной частоте до балансировки рабочего колеса ВУ типа ВЦ14-46-4. СКЗ виброскорости – 4,5 мм/с на оборотной частоте

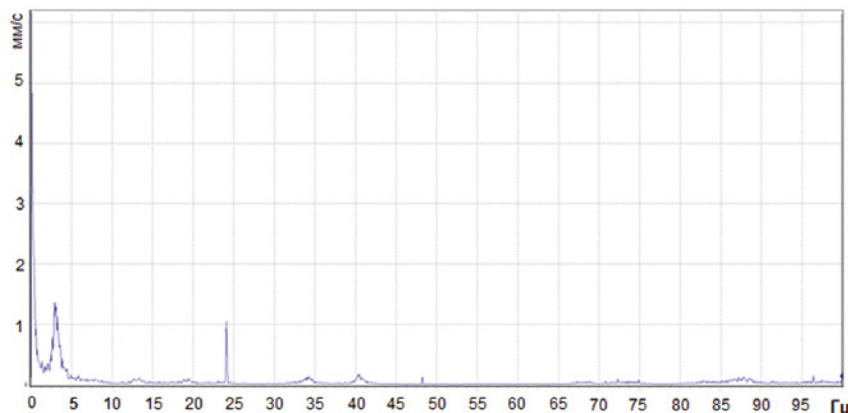


Рис. 3. Уменьшение вибрации на оборотной частоте после балансировки рабочего колеса ВУ типа ВЦ14-46-4. СКЗ виброскорости – 1,6 мм/с на оборотной частоте

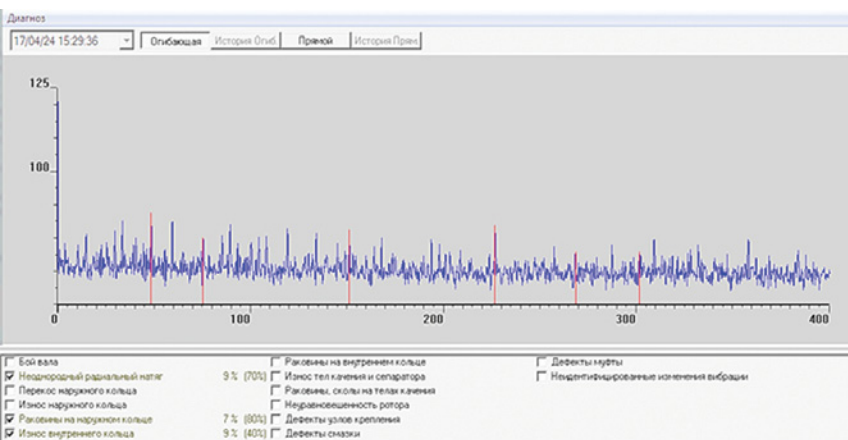


Рис. 4. Признаки дефектов подшипника в программе DREAM до балансировки

Таблица 4
Признаки дефектов ВУ с клиноременной передачей по ГОСТ 13373-5-2022

Вид дефекта ВУ с клиноременной передачей	Характерные частотные составляющие в узкополосном спектре вибрации	
	основные	дополнительные
Износ или ослабление натяжения ремней. Резонанс ремней	$kf_{\text{ремня}}$	Осмотр ремней со стробоскопом
Эксцентриситет шкивов	$f_{\text{вр.эд}}$ или $f_{\text{вр.рк}}$	Проверка наличия пика $f_{\text{вр.эд}}$ со снятыми ремнями
Несоосность шкивов	$f_{\text{вр.эд}}$ или $f_{\text{вр.рк}}$ в осевом направлении	

Здесь $kf_{\text{ремня}}$ – частота вращения ремня, $f_{\text{вр.эд}}$ – частота вращения электродвигателя, $f_{\text{вр.рк}}$ – частота вращения рабочего колеса

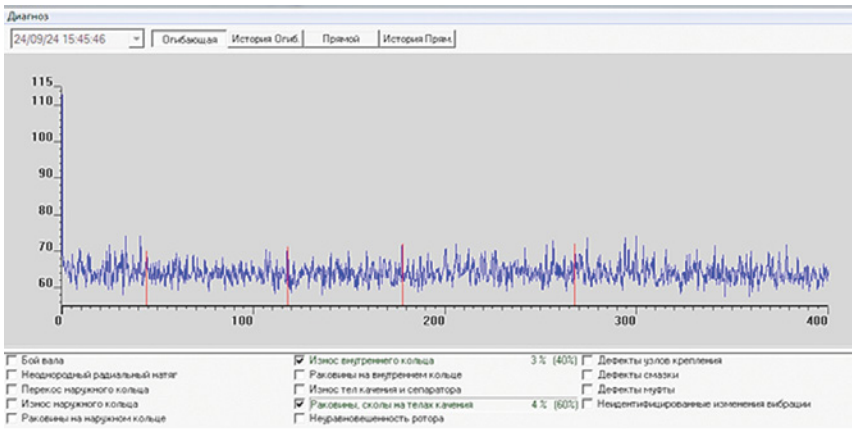


Рис. 5. Признаки дефектов подшипника в программе DREAM после балансировки

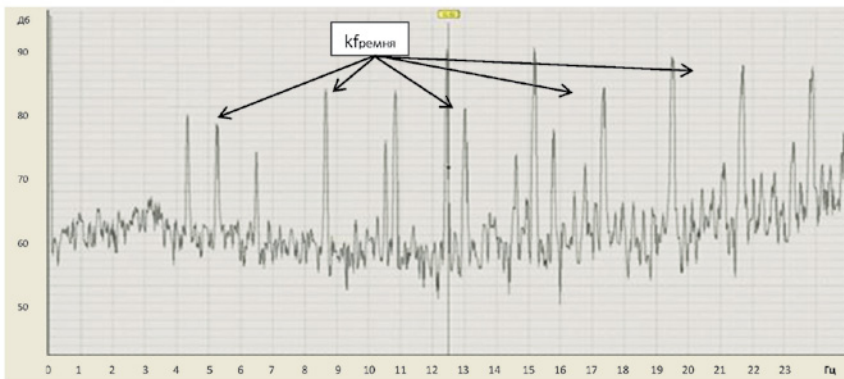


Рис. 6. Узкополосный спектр вибрации ВУ с клиноременной передачей при разном износе/растягивании ремней. Радиальное направление измерения

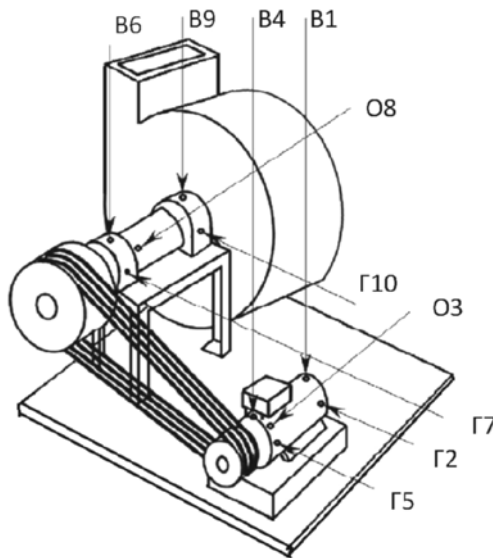


Рис. 7. Эскиз точек установки вибродатчика на ВУ с клиноременной передачей

1. Результаты измерения общего уровня вибрации и результаты измерений на частоте вращения двигателя и на частоте вращения вентилятора изменяются во времени, так как в ВУ с клиноременной передачей ремни обычно имеют износ (зачастую шкивы тоже изношены), а продукты истирания часто остаются на поверхностях клинообразных пазов в шкивах. Из-за этих дефектов клиноременной передачи появляется переменная часть

силы натяжения ремня, часто большая по величине. От нее зависит и вибрация на гармониках частоты вращения ремня. Самое большое изменение происходит, когда скачки натяжения совпадают по времени от всех трех дефектов, но это встречается редко – раз на несколько сот или тысяч оборотов. Соответственно такие скачки фиксируются и в измерениях общего уровня, и гармоник частоты вращения двигателя, рабочего колеса и ремня.

Если ремень один, то признаками его неравномерного износа являются:

- нестабильность вибрации от измерения к измерению;
- рост вибрации на гармониках частоты вращения ремня;
- модуляция вибрации на оборотных частотах двигателя и рабочего колеса частотой вращения ремня.

Если ремней несколько, то признаками дефектов неравномерного износа (растягивания) ремней являются:

- рост кратных гармоник вибрации на частотах вращения ремня (кратность близка к числу ремней) (рис. 6);
- появление боковых субгармоник у наиболее сильных составляющих, кратных частоте вращения ремней;
- «раздвоение» гармоник повышенной кратности в ряду гармоник, кратных частоте вращения ремня (у вытянутого ремня частота вращения снижается);
- рост вибрации на гармониках частоты вращения двигателя и вентилятора с кратностью, равную количеству ремней.

Рекомендациями по снижению уровня вибрации вентиляторов с ременной передачей являются поиск признаков дефектов ремня. Если есть такие признаки, то прежде всего надо шлифовать пазы в шкивах передачи и оценить вибрацию после шлифовки. Если признаки сохранились, то следует менять ремни. Если признаки дефектов ремней (шкивов) остаются, то менять шкивы.

2. Опыт работ по наладке ВУ с клиноременной передачей мощностью до 30 кВт показал, что для снижения общих уровней вибрации оптимальным будет последовательное выполнение алгоритма (рис. 10), а не поиск признаков дефектов в спектре вибрации клиноременной передачи. Это связано с тем, что для ВУ с клиноременной передачей, имеющих значительный износ, дефекты многочисленные и характерные гармоники признаков дефектов в узкополосном спектре вибрации накладываются друг на друга.

Пример наладки ВУ с ременной передачей. Точки измерения вибрации на ВУ с клиноременной передачей указаны на рис. 7. Результаты замеров общих уровней СКЗ вибрации ВУ типа Ц4–76–16 с электродвигателем 4А180С4У3 (22 кВт), в процессе виброналадки представлены в табл. 5. При проведении измерений выявлены значительные изменения уровня вибрации (вследствие износа шкивов и биения ремней). Число усреднений при измерениях было увеличено до 10–20 (рис. 8). При проведении спектрального анализа узкополосного спектра вибрации определен его оптимальный диапа-

Результаты виброналадки ВУ типа Ц4-76-16 с клиноременной передачей

№ точки	СКЗ виброскорости, мм/с			
	ВУ в сборе до виброналадки	После балансировки ЭД с ведущим шкивом при снятых ремнях	ВУ в сборе с установленными ремнями, после центровки шкивов	После подбалансировки ведомого шкива и рабочего колеса
B1	7,0	1,4	6,1	9,8
Г2	7,4	0,9	4,2	7,7
O3	7,2	0,9	6,2	15,1
B4	5,2	0,9	4,0	3,9
Г5	7,0	0,9	4,0	5,0
B6	4,8	–	5,5	4,0
Г7	5,4	–	6,3	7,9
O8	13,9	–	14,8	14,6
B9	4,4	–	5,7	4,9
Г10	5,9	–	4,3	8,6

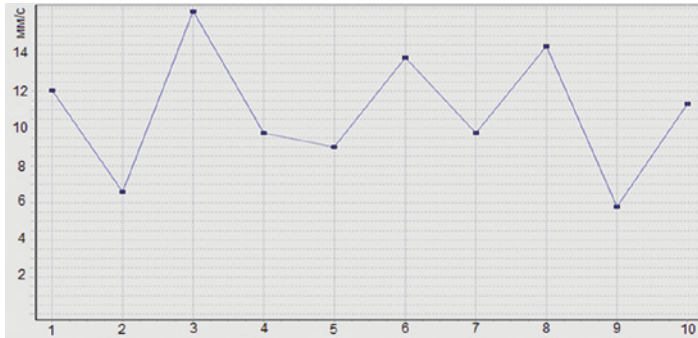
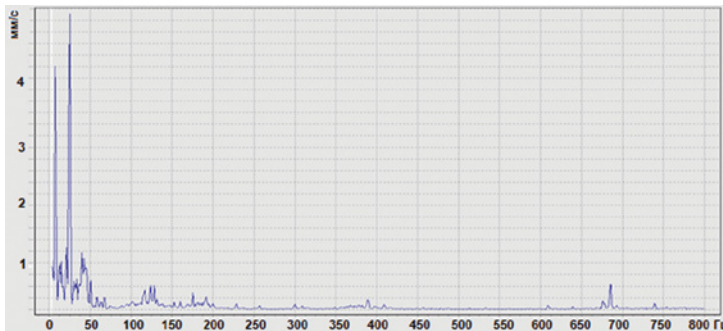
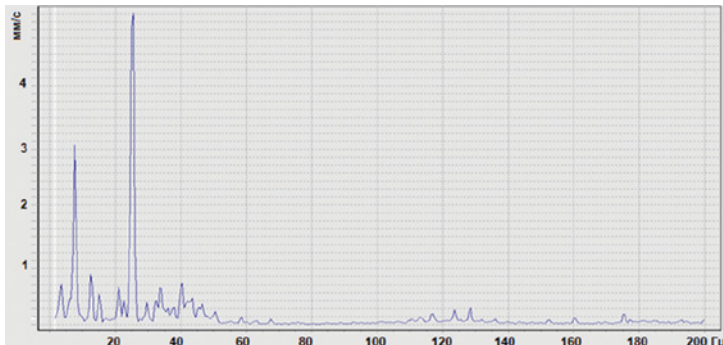


Рис. 8. Значения уровней вибрации, включенных в усредненное значение СКЗ виброскорости для ВУ с клиноременной передачей

а)



б)



в)

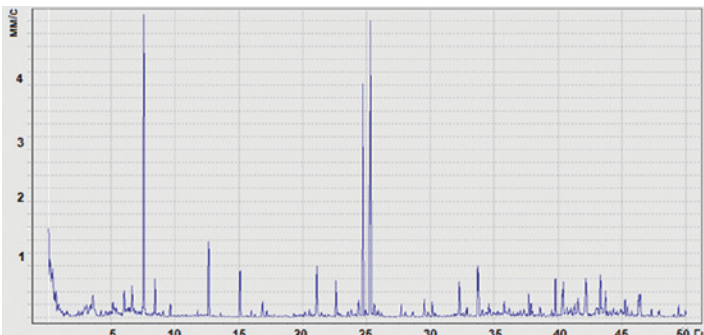


Рис. 9. Спектр виброскорости ВУ Ц4-76-16 (1410/475 об/мин). Диапазон: а – до 800 Гц, б – 200 Гц, в – до 50 Гц

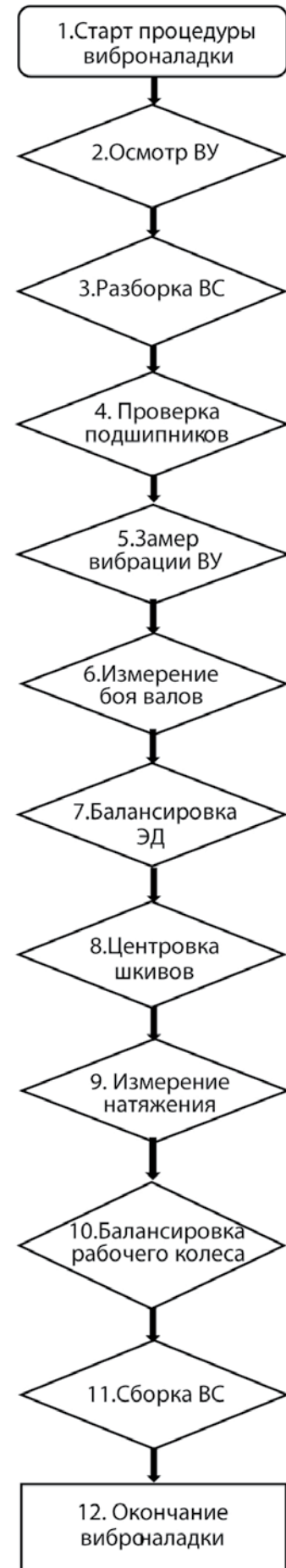


Рис. 10. Алгоритм виброналадки ВУ с клиноременной передачей

зон – до 50 Гц (рис. 9, а – в). При осмотре данной ВУ обнаружен сильный износ ручейков шкивов и невозможность точной центровки шкивов из-за замены приводного электродвигателя. Последовательная виброналадка по алгоритму (рис. 10) не дала существенного снижения вибрации.

Для продолжения наладки необходим капитальный ремонт ВУ с заменой изношенных шкивов. Рациональной альтернативой однокомпонентных шкивов является замена на быстроремонтируемые шкивы типа Taper Bushes или аналогичные.

Алгоритм виброналадки ВУ с клиноременной передачей мощностью до 30 кВт:

1. Анализ эксплуатационной документации. Составление протокола измерений общих уровней вибрации. Сохранение СКЗ и узкополосных спектров в программе обработки данных (СД-21 или Vibro-12).

2. Проведение осмотра ВУ, ЭД, крепежа, рамы, фундамента, амортизаторов, целостности шкивов, поверхностей ручейков шкивов, рабочего колеса. Заполнение акта осмотра.

3. Снятие кожухов, решеток ограждения, эластичных вставок вентиляционной системы (ВС).

4. Оценка технического состояния подшипников (с применением вибрo-анализатора и программы DREAM или стетоскопа).

5. Измерение вибрации на ВУ, отсоединенной от вентиляционной системы (при необходимости).

6. Измерение боя валов двигателя и ведомого вала (при возможности) индикатором часового типа (ИЧ). Сравнение результатов с нормативными значениями.

7. Балансировка электродвигателя (ЭД) и ведущего шкива со снятыми ремнями (вибрoанализаторы СД-21 или Агат-М).

8. Центровка шкивов с помощью центровщика шкивов Fixturelaser PAT или других приспособлений.

9. Установка ремней, регулировка натяжения ремней с помощью измерителей натяжения ремней (Optikrik I, II).

10. Двухплоскостная балансировка ведомого шкива и рабочего колеса. Измерение вибрации (анализатор СД-21 или Агат-М).

11. Сборка вентиляционной системы. Установка кожухов, решеток ограждения, брезентовых рукавов.

12. Составление протокола измерений общих уровней вибрации. Сохранение СКЗ и узкополосных спектров в программе обработки данных (СД-21 или Vibro12).

ВЫВОДЫ

Балансировка радиальных центробежных ВУ позволяет добиться существенного снижения общего уровня вибрации в случае отсутствия развитых дефектов. Снижение вибрации ВУ уменьшает нагрузку на подшипники и продлевает срок службы ВУ в целом.

Рекомендациями по снижению уровня вибрации вентиляторов с клиноременной передачей являются поиск признаков дефектов ремня. Если есть такие признаки, следует шлифовать пазы в шкивах передачи и оценить вибрацию после шлифовки. Если признаки сохранились, то надо менять ремни. Если признаки дефектов ремней (шкивов) остаются – менять шкивы.

Для ВУ с клиноременной передачей, имеющих износ шкивов, дефекты крепления, искривление валов электродвигателя балансировка рабочего колеса, шкивов и ЭД не дает существенного снижения вибрации, поэтому для проведения виброналадки необходим капитальный ремонт ВУ с заменой изношенных частей.

Для ВУ с клиноременной передачей, имеющей сильный износ, при измерении общего уровня вибрации необходимо выбирать большее количество усреднений (от 10 до 20).

Алгоритм виброналадки ВУ с клиноременной передачей мощностью

до 30 кВт, приведенный выше, может быть дополнен.

ЛИТЕРАТУРА

- ГОСТ 31350–2007. Вентиляторы промышленные. Требования к производимой вибрации и качеству балансировки.
- ГОСТ 13373–5–2022. Методы диагностирования вентиляторов и воздуходувок.
- НД № 2–020101–174. Правила классификации и постройки морских судов Часть VII. Механические установки.
- ГОСТ 5976–2020 Вентиляторы радиальные общего назначения. Общие технические условия.
- ГОСТ 34060–2017. Инженерные сети зданий и сооружений внутренние. Правила проведения и контроль выполнения работ.
- ГОСТ Р ИСО 1081–94. Передачи клиноременные. Термины и определения.
- ГОСТ 20889–88. Шкивы для приводных клиновых ремней нормальных сечений. Общие технические условия.
- ГОСТ Р 50640–94. Шкивы приводных ремней передач. Общие технические требования.
- ГОСТ Р 50642–94. Шкивы приводных ремней передач. Система, основанная на исходной ширине.
- Очиров В. С. Пусконаладочные работы и паспортизация вентиляционных систем. – Восточно-Сибирский ГТУ, 2009. – С. 39
- Баркова Н. А. Введение в виброакустическую диагностику роторных машин и машин и оборудования: учеб. пособие. – СПб.: Изд. центр СПбГМТУ, 2003. – 160 с.
- Вибродиагностика. – В кн.: Неразрушающий контроль: справ./ Под общ. ред. В. В. Клюева. – М.: Машиностроение, 2005. – Т. 7. – Кн. 2. – 829 с.
- 900.ИУЕА.21.128–2023. Инструкция. Эксплуатация, техническое обслуживание и ремонт вентиляционных систем подразделений АО «СПО «Арктика».
- РД. ИУЕА.014–2024. Методика. Измерение и контроль вибрации промышленных вентиляционных установок», устанавливающая порядок измерения и контроля ВУ.
- ИУЕА.25001.22809. Инструкция по наладке вентиляционных установок», определяющая порядок и способы наладки ВУ.
- 900.ИУЕА.22828. Программа обучения «Измерение, контроль вибрации и наладка вентиляционных установок». ■

Цифровая трансформация судостроения меняет не только используемое программное обеспечение и оборудование, но и организацию процессов создания судна. Проектирование, технологическая подготовка производства, материально-техническое обеспечение, изготовление деталей и секций, монтаж оборудования, испытания, сдача и последующая эксплуатация должны опираться на согласованные данные. В цифровом контуре управления жизненным циклом судна эти данные формируют его единую информационную модель, которая развивается вместе с объектом и обеспечивает информационную взаимосвязь конструкторского бюро, верфи, поставщиков, заказчика и эксплуатирующей организации.

Такая модель требует новых компетенций на всех уровнях проектирования и производства. Цифровая верфь не может быть построена только усилиями архитекторов информационных систем и программистов. На всех этапах жизненного цикла судна необходимы специалисты, которые понимают физический объект, читают судостроительные чертежи, знают устройство судна и одновременно умеют работать с цифровыми данными. Отрасли нужны кадры, соединяющие профессиональные судостроительные знания с инструментами CAD/CAE, PLM/PDM, MDM, ERP/MES и цифрового производства.

Публично озвученные оценки подтверждают актуальность задачи. На совещании по вопросу подготовки

ИТ-кадров для судостроения, которое проводилось в Санкт-Петербургском государственном морском техническом университете под председательством помощника Президента России, председателя Морской коллегии РФ Н.П. Патрушева, отмечалось, что полноценную производственную стажировку проходит лишь ограниченная доля студентов инженерных специальностей, поэтому многие выпускники после трудоустройства не готовы сразу работать с современным оборудованием и программным обеспечением. Одновременно растет потребность в специалистах по информационному моделированию,

управлению инженерными данными и сопровождению цифровых производственных процессов [1].

Особенно заметен дефицит кадров среднего звена. Именно они ведут техническую и технологическую документацию, контролируют данные об изделиях и материалах, сопровождают монтаж и испытания, обслуживают автоматизированное оборудование и участвуют в подготовке производства. При переходе к цифровой верфи традиционные функции техника не исчезают, а дополняются ответственностью за полноту, корректность, версию и прослеживаемость данных.

ОБНОВЛЕННЫЕ СУДОСТРОИТЕЛЬНЫЕ ПРОФЕССИИ. ЦИФРОВАЯ ВЕРФЬ

Цифровая верфь – это интеграция проектирования, производства и эксплуатации на единой цифровой платформе

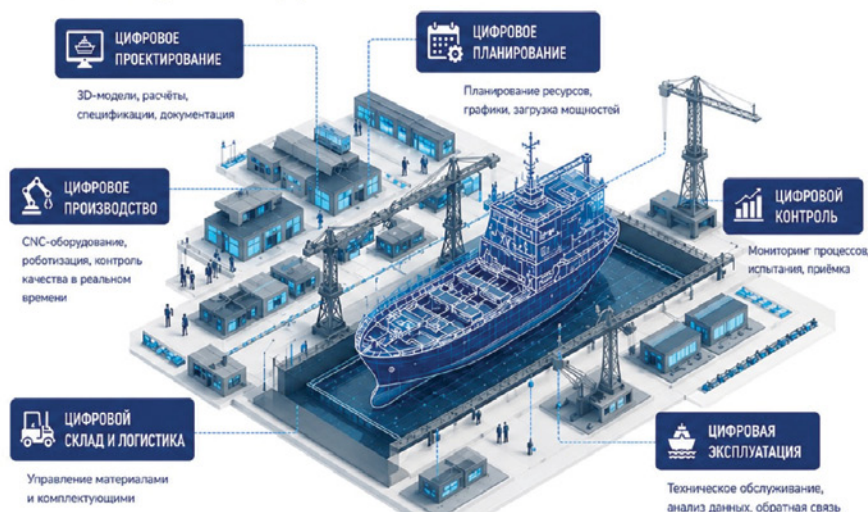


Рис. 1. Цифровая верфь: единый информационный контур и новые функции специалистов среднего звена

ОТ ЧЕРТЕЖА К ЕДИНОЙ ИНФОРМАЦИОННОЙ МОДЕЛИ СУДНА

ПОДГОТОВКА СПЕЦИАЛИСТОВ СРЕДНЕГО ЗВЕНА ДЛЯ ЦИФРОВОГО СУДОСТРОЕНИЯ

И.В. Щербakov, магистр делового администрирования, ген. директор,
А.В. Новиков, канд. техн. наук, магистр делового администрирования, доцент,
чл.-корр. Российской инженерной академии, зам. ген. директора по развитию,
ООО ПКБ «Петробалт»,

В.Е. Щербakov, зам. директора колледжа СПбГМТУ,

Е.Н. Шелег, руководитель направления по работе с учебными заведениями
АО «АСКОН»,

М.В. Василевская, управляющий Фонда развития перспективных проектов,

О.В. Юркина, магистр делового администрирования, начальник отделения
карьерного развития и профориентации, СПбМРК, председатель секции №3
Морского совета при Губернаторе Ленинградской области,
контакт. тел. +7(921) 902 7706, +7(905)226 3649, +7(921)908 6629,
+7(952)377 6041, +7(962) 344 8017, +7 (921) 995 7773,

shcherbakov.ilya@petrobalt.ru, novikov.andrey@petrobalt.ru, vadim_shcherbakov@

vk.com, sheleg_en@ascon.ru, mariya.vasilevskaya@praktik.work, ovy_spbmrk@mail.ru



КЛЮЧЕВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

- PLM / PDM** управление жизненным циклом изделия
- MDM** управление нормативно-справочной информацией
- ERP / MES** планирование ресурсов и производства
- IIoT** датчики и мониторинг оборудования
- CAD / CAE** проектирование и инженерные расчеты
- ИБ и защита данных** безопасность информации и процессов

НОВЫЕ ПРОФЕССИИ СРЕДНЕГО ЗВЕНА

- ОПЕРАТОР БАЗ ДАННЫХ**
Ведение данных об изделии, оборудовании, материалах и технологиях
- ТЕХНИК ЦИФРОВОГО ПРОИЗВОДСТВА**
Настройка и обслуживание цифрового оборудования и систем
- ТЕХНИК-АНАЛИТИК ПРОЦЕССОВ**
Анализ данных, оптимизация процессов, контроль эффективности

РЕАЛИЗАЦИЯ ВЫПУСКНИКОВ В ПРОФЕССИОНАЛЬНОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ

26.02.02 СУДОСТРОЕНИЕ	26.02.04 МОНТАЖ И ТЕХНИЧЕСКОЕ ОБСЛУЖИВАНИЕ СУДОВЫХ МАШИН И МЕХАНИЗМОВ	26.02.06 ЭКСПЛУАТАЦИЯ СУДОВОГО ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЯ И СРЕДСТВ АВТОМАТИКИ
НА ВЕРФИ • сборщик корпусов металлических судов • судокорпусник-ремонтник • сборщик-достройщик судовой • мастер	НА ВЕРФИ • слесарь-монтажник судовой • слесарь-механик по испытанию установок и аппаратуры • слесарь-механик по судовым системам	НА ВЕРФИ • электромонтажник судовой • электрик судовой
В КОНСТРУКТОРСКОМ БЮРО • техник в отделе конструкции корпуса • техник в отделе судовых устройств и дельных вещей • техник в отделе достройки	В КОНСТРУКТОРСКОМ БЮРО • техник в отделе судовых систем • техник в отделе систем СЭУ	В КОНСТРУКТОРСКОМ БЮРО • техник в электротехническом отделе • техник в отделе автоматизации судов
		

Рис. 2. Возможные позиции выпускников профильных программ СПО на верфи и в конструкторском бюро

На предприятиях формируются новые или существенно обновленные функциональные роли: оператор баз данных о составе изделия, техник цифрового производства, оператор автоматизированного технологического комплекса, специалист по сопровождению инженерных данных, техник-аналитик процессов. Эти функции требуют сочетания профессиональной судостроительной подготовки и навыков работы с цифровыми инструментами. Специалист должен понимать конструкцию корпуса, судовые механизмы, электрооборудование, системы автоматизации, материалы и технологию постройки судна.

Обобщенная схема цифровой верфи и функциональные роли специалистов среднего звена представлены на рис. 1.

ПОЧЕМУ КОЛЛЕДЖ СТАНОВИТСЯ КЛЮЧЕВЫМ ЗВЕНОМ

Среднее профессиональное образование позволяет молодому человеку после девятого класса быстрее войти в отрасль, получить квалификацию техника и начать профессиональную деятельность примерно в возрасте 19–20 лет. Дальнейшее обучение в университете может проходить параллельно с работой, а накопленный производственный опыт делает высшее образование более осмысленным и прикладным.

Такой маршрут не противопоставляется высшему образованию. Колледж становится первым профессиональным уровнем бесшовной траектории «инженерный класс–колледж–университет–предприятие». Выпускник получает самостоятельную квалификацию, востребованную в конкретных процессах, а предприятия – сотрудника, компетенции которого можно последовательно развивать, включая получение

высшего образования и повышение квалификации.

Для задач цифрового судостроения особое значение имеют три специальности СПО:

26.02.02 «Судостроение» формирует понимание корпусных конструкций, материалов, сборки секций, формирования корпуса, монтажно-достроечных работ и ремонта морской техники. Выпускник может работать на верфи или техником в подразделениях корпусных конструкций, судовых устройств и достройки конструкторского бюро [3].

26.02.04 «Монтаж и техническое обслуживание судовых машин и механизмов» охватывает монтаж, обслуживание и ремонт механизмов и систем, а также разработку типовой конструкторско-технологической документации. В цифровом контуре такой специалист способен сопровождать сведения об оборудовании, трубопроводах, монтажных единицах и испытаниях [4].

26.02.06 «Эксплуатация судового электрооборудования и средств автоматики» ориентирована на эксплуатацию, диагностику и ремонт электрооборудования и средств автоматизации. Для современной верфи и судна это направление связано с автоматизированными комплексами, датчиками, системами контроля и данными о конфигурации электротехнических систем. [5]

На момент запуска проекта колледж СПбГМТУ реализует программы по мехатронике и робототехнике, монтажу и техническому обслуживанию судовых машин и механизмов, а также экономике и бухгалтерскому учету. Концепция, предложенная индустриальным партнером в лице ПКБ «Петробалт», предусматривает развитие программы 26.02.04 и подготовку к открытию специальностей

26.02.02 и 26.02.06. Такой набор позволяет охватить основные предметные области информационной модели судна: корпус, механизмы и системы, электрооборудование и автоматизацию [2].

Возможные направления профессиональной деятельности выпускников трех профильных специальностей показаны на рис. 2.

Ценность выпускника колледжа для цифрового предприятия заключается не только во владении отдельными программными продуктами. Он должен понимать, что единая информационная модель судна представляет собой структурированный комплекс взаимосвязанных инженерных данных. Каждая деталь имеет обозначение, материал, массу, принадлежность к определенной системе, место установки, версию, статус согласования и связь с конструкторской и технологической документацией. Ошибка в этих данных может привести к неверной закупке, коллизии при монтаже или задержке строительства судна. Поэтому культура работы с инженерными данными должна формироваться одновременно с профессиональными судостроительными знаниями.

МОДЕЛЬ ПАРТНЕРСТВА: КОЛЛЕДЖ –КОНСТРУКТОРСКОЕ БЮРО– РАЗРАБОТЧИК ПО

Совместный проект строится на распределении ролей между тремя участниками. Колледж СПбГМТУ формирует образовательную среду, организует работу преподавателей и студентов, связывает проект с дисциплинами и профессиональными модулями. Принадлежность колледжа к структуре СПбГМТУ создает естественную траекторию продолжения обучения и участия студентов в инженерных и научных мероприятиях.

ПКБ «Петробалт» выступает индустриальным и научно-методическим партнером. Бюро передает реальную проектную задачу, знакомит студентов с назначением судна и логикой работы проектной организации, помогает работать с документацией и оценивает результат с профессиональной точки зрения. Для предприятия это одновременно формирование кадрового резерва и возможность влиять на содержание подготовки будущих сотрудников [6].

Компания «АСКОН» предоставляет российские цифровые инструменты и методическую поддержку. Образовательная программа компании включает учебные лицензии, пособия, обучение преподавателей, техническую поддержку, конкурсы и сертификацию. На первом этапе базовым инструментом стал КОМПАС-3D, позволяющий создавать модели деталей и сборок, оформлять чертежи и спецификации. В дальнейшем цифровой контур может быть расширен системой ЛОЦМАН:PLM для управления данными жизненного цикла изделия и системой ПОЛИНОМ:MDM для управления нормативно-справочной информацией [7].

Такое развитие соответствует логике цифровой платформы судостроения АСКОН, в которой КОМПАС-3D используется как среда проектирования, ЛОЦМАН:PLM – как платформа управления данными жизненного цикла изделия, а производственный контур связывается с системами планирования и управления. Студент должен увидеть не набор изолированных программ, а единую цепочку: 3D-модель – структура изделия – документация – материалы и комплектующие – производственное задание – контроль исполнения – обратная связь [8].

ПРОЕКТ «3D «СПАСАТЕЛЬ»: ОТ УЧЕБНОГО ЗАДАНИЯ К ПРОИЗВОДСТВЕННОЙ ЛОГИКЕ

Практическим ядром сотрудничества стал проект «3D «Спасатель», начатый в марте 2026 г. В пилотную группу вошли студенты первого курса специальностей 15.02.10 «Мехатроника и робототехника» и 26.02.04 «Монтаж и техническое обслуживание судовых машин и механизмов». Работа была включена в обязательный элемент программы среднего общего образования «Индивидуальный проект» [9, 10].

Цель первого этапа – изучить техническую документацию многофункционального аварийно-спасательного судна, создать трехмерные модели отдельных элементов, изготовить их средствами 3D-печати и в дальнейшем объединить в стеновой макет. ПКБ «Петробалт» передало колледжу чертежи и



Рис. 3. Вводные занятия для участников проекта «3D «Спасатель»

сформулировало отраслевую задачу, а «АСКОН» оснастил учебный класс системой трехмерного моделирования КОМПАС-3D [10].

Проект начался с вводных встреч. Первый заместитель генерального директора – главный инженер ПКБ «Петробалт» Станислав Тимофеев познакомил студентов с направлениями работы бюро и тенденциями современного судостроения. Представители «АСКОН» показали возможности цифровых инструментов для моделирования корпуса судна, инженерных расчетов и управления жизненным циклом изделия. Студентов изначально позиционировали не как пассивных слушателей, а как будущих коллег, отвечающих за конкретную часть общего результата.

Фрагменты вводных занятий индустриальных партнеров представлены на рис. 3.

Группа была разделена на проектные подгруппы. Одни студенты занимались элементами корпуса, другие – рулевой рубкой, мачтовым оборудованием, винторулевой группой и отдельными устройствами. Каждая подгруппа выполняла последовательность действий, близкую к упрощенному производственному процессу: чтение чертежа, анализ назначения элемента, построение трехмерной модели, проверка геометрии, подготовка к печати, разбиение на слои, изготовление детали и оценка результата. Одновременно с выполнением проектных заданий студенты осваивали фундаментальные теоретические знания в области судостроения и профессиональную терминологию.

Для первокурсников особенно важен переход от абстрактного упражнения к объекту реального назначения. При моделировании недостаточно механически повторить контур: необходимо понимать функцию элемента, его связи с соседними конструкциями и ограничения компоновки. Так трехмерное моделирование



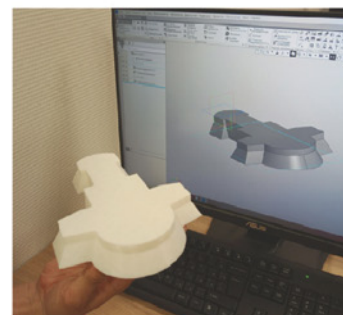
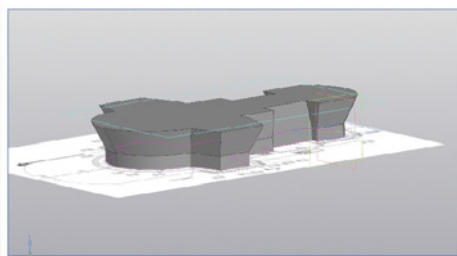
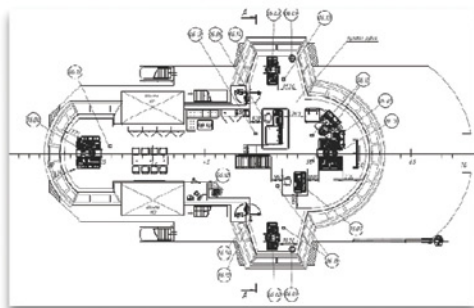
становится способом изучения устройства судна, а не самоцелью.

Первый цикл завершился защитой. Студенты представляли назначение выбранного элемента, описывали ход работы, демонстрировали цифровую модель и изготовленную деталь. Комиссия оценивала понимание конструкции, логику решений, качество объяснения и способность отвечать на вопросы. Формат приближает учебную деятельность к инженерному рассмотрению проекта и формирует привычку обосновывать результат.

Основные этапы практической работы студентов приведены на рис. 4.

КАКИЕ КОМПЕТЕНЦИИ ФОРМИРУЕТ ПРОЕКТ ?

На видимом уровне проект дает навыки чтения чертежей, трехмерного моделирования и 3D-печати. Его образовательный эффект значительно шире. Во-первых, формируется предметное мышление. Студент видит судно как систему взаимосвязанных конструкций, механизмов, устройств и оборудования и начинает различать геометрический образ детали и ее функцию. Во-вторых, появляется представление о коллективном проектировании. Отдельная модель должна быть согласована с соседними элементами, выполнена в заданном масштабе, иметь правильные присоединительные размеры и входить в общую сборку. Даже учебный макет ставит вопросы интерфейсов, координации и ответственности за границы работ. В-третьих, закладывается культура работы с данными: обозначения, структура файлов, актуальные версии, фиксация изменений, проверка исходной информации и передача результата другой подгруппе. Эти навыки становятся основой будущей работы в PLM- и MDM-системах. В-четвертых, развивается производственная ответственность. Напечатанная деталь наглядно



Чтение чертежей

3D-моделирование в КОМПАС-3D

Разбиение модели на слои и 3D-печать

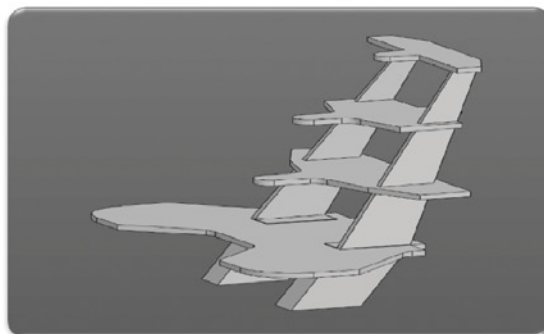
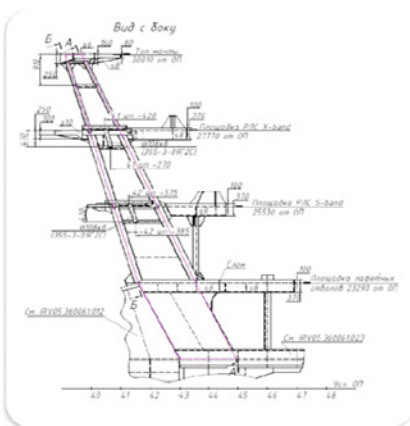


Рис. 4. Последовательность работы: чтение чертежей, моделирование в КОМПАС-3D и 3D-печать

показывает последствия ошибки цифровой модели: неточный размер, неправильная ориентация или неучтенный стык превращаются в физический дефект. Цифровая ошибка перестает быть отвлекающей.

Наконец, проект формирует профессиональную мотивацию. Первокурсник получает ранний опыт содержательной работы с реальным судном и видит связь между текущим обучением и будущей профессией.

ОТ ПИЛОТА К СИСТЕМНОЙ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЙ ПРОГРАММЕ

На 2026/2027 учебный год предусмотрено продолжение работы: завершение моделирования и изготовления методом 3D-печати комплекта деталей и их интеграция в единый стендовый макет. Планируется провести вводные занятия с промышленными партнерами для нового набора и распространить практику 3D-моделирования на всех первокурсников специальности 26.02.04 [10].

Следующий шаг – актуализация рабочих программ. Проектные задания могут быть встроены в «Индивидуальный проект», «Общее устройство судов», инженерную и компьютерную графику, материаловедение, основы технологии судостроения и профессиональные модули. Единый объект – информационная модель судна – связывает дисциплины и

позволяет постепенно наращивать детализацию.

Для подготовки кадров цифровой верфи целесообразно сформировать сквозной модуль, включающий основы информационной модели судна; электронную конструкторскую и технологическую документацию; структуру изделия и конфигурационное управление; нормативно-справочную информацию; базовые процессы PLM; связь проектных данных с ERP/MES; управление изменениями и качеством данных; командную работу в междисциплинарном проекте.

Важно не превращать обучение в курс по нажатию кнопок конкретной программы. Программное обеспечение будет развиваться, но инженерная логика остается: определить объект, описать его свойства и связи, обеспечить достоверность данных, согласовать изменение и обеспечить передачу актуальных данных по сквозному информационному процессу от проектирования к технологической подготовке, производству и последующей эксплуатации. Поэтому цифровые навыки должны преподаваться через отраслевую задачу [11].

В дальнейшем стендовый макет может стать частью цифровой лаборатории. Каждой детали можно присвоить идентификатор и связать ее с электронной карточкой, чертежом, моделью, материалом, версией и статусом. Сту-

денты смогут моделировать процессы изменения конструкции, согласования документации, формирования спецификации, подготовки закупки и контроля комплектации. Макет также может быть дополнен датчиками и элементами автоматизации, объединив компетенции судостроителей, механиков, электромехаников и мехатроников.

ЭФФЕКТ ДЛЯ КОЛЛЕДЖА, ПРЕДПРИЯТИЙ И ОТРАСЛИ

Для колледжа такая партнерская модель означает актуализацию программ под реальные задачи, повышение цифровых компетенций студентов и преподавателей, рост привлекательности судостроительных специальностей и устойчивые связи с работодателями. Абитуриент видит конкретные проекты, оборудование, программные средства и участие инженеров отрасли.

Для предприятий результат выражается в появлении выпускников, знакомых с профессиональной терминологией, документацией и логикой цифрового проекта. Это может сократить период первичной адаптации и затраты на дообучение. Кроме того, предприятие получает возможность заранее выявлять мотивированных студентов, предлагать им практику, наставничество и карьерные траектории.

Для отрасли проект создает воспроизводимую модель подготовки кадров

РЕЗУЛЬТАТ ДЛЯ КОЛЛЕДЖА, ПРЕДПРИЯТИЙ И ОТРАСЛИ



ДЛЯ КОЛЛЕДЖА

- ✓ Актуальные программы под задачи отрасли
- ✓ Современные цифровые компетенции у студентов
- ✓ Рост привлекательности Колледжа и числа абитуриентов
- ✓ Сильные партнерства с ведущими предприятиями
- ✓ Повышение качества и конкурентоспособности выпускников



ДЛЯ ПРЕДПРИЯТИЙ

- ✓ Готовые специалисты, не требующие длительного дообучения
- ✓ Снижение затрат на адаптацию и обучение
- ✓ Повышение производительности и качества работ
- ✓ Кадровый резерв для устойчивого роста
- ✓ Быстрая интеграция выпускников в цифровые процессы



ДЛЯ ОТРАСЛИ

- ✓ Сокращение кадрового дефицита
- ✓ Ускорение цифровой трансформации предприятий
- ✓ Рост конкурентоспособности российского судостроения
- ✓ Устойчивое развитие и технологический суверенитет
- ✓ Формирование новой генерации специалистов для Судостроения 4.0



Рис. 5. Результаты проекта для колледжа, предприятий и судостроительной отрасли

для цифровой трансформации. Ее сильная сторона – в междисциплинарной кооперации участников, сочетающей образовательные, производственный и цифровые технологии, что согласуется с принципами реализации научно-образовательных инициатив в контексте четвертой промышленной революции [12]. Такая конструкция может масштабироваться на другие колледжи, верфи и проектные организации с учетом региональной специализации.

Ожидаемые эффекты партнерской модели для колледжа, предприятий и отрасли обобщены на рис. 5.

Развитие проекта целесообразно оценивать по измеримым показателям: числу дисциплин со сквозными цифровыми заданиями; доле студентов, выполнивших задания индустриального партнера; числу преподавателей, прошедших повышение квалификации; количеству практик и профильных трудоустройств; результатам независимой оценки моделей и документации; сокращению периода адаптации выпускников на предприятии.

ВЫВОДЫ

Переход к единой информационной модели судна меняет кадровый запрос судостроения. Цифровой проект и цифровая верфь требуют значительного числа специалистов среднего звена, которые понимают устройство судна и умеют работать с инженерными данными, автоматизированным оборудованием и отечественными цифровыми системами.

Совместный проект колледжа СПбГМТУ, ПКБ «Петробалт» и «АСКОН» показывает практический путь решения задачи. Студенты с первого курса получают реальную отраслевую документацию, осваивают КОМПАС-3D, изготов-

ливают физические элементы модели и защищают результат перед профессиональной комиссией. Колледж организует обучение, конструкторское бюро обеспечивает инженерное содержание, разработчик ПО – цифровую среду и методическую поддержку.

Главный результат проекта заключается не в изготовлении стендового макета как такового. Макет становится средством формирования нового типа специалиста – техника, который видит за трехмерной геометрией структуру изделия, за чертежом – производственный процесс, за записью в базе данных конкретную конструкцию, оборудование или материал. Именно такие специалисты обеспечат практическую устойчивость цифровой трансформации российских верфей и конструкторских бюро, а последующее присоединение к проекту колледжей по эксплуатации судов позволит распространить эту логику на все этапы жизненного цикла судна – от проектирования до управления флотом.

ЛИТЕРАТУРА

1. Патрушев назвал пути решения проблем с ИТ-кадрами в судостроении. – URL: <https://1prime.ru/20260123/kadry-866828416.html> Дата обращения: 05.08.2026.
2. Колледж СПбГМТУ (СТФ): официальная страница подразделения. – URL: <https://fgos.ru/fgos/fgos-26-02-sudostroenie-659/> Дата обращения: 05.08.2026.
3. ФГОС СПО по специальности 26.02.02 «Судостроение». URL: <https://fgos.ru/fgos/fgos-26-02-02-sudostroenie-659/> Дата обращения: 05.08.2026.
4. ФГОС СПО по специальности 26.02.04 «Монтаж и техническое обслуживание судовых машин и механизмов». – URL: <https://fgos.ru/fgos/fgos-26-02-04-montazh-i-tehnicheskoe-obsluzhivanie-sudovyh-mashin-i-mehanizmov-690/> Дата обращения: 05.08.2026.

5. ФГОС СПО по специальности 26.02.06 «Эксплуатация судового электрооборудования и средств автоматики». – URL: <https://fgos.ru/fgos/fgos-26-02-06-ekspluatatsiya-sudovogo-elektrooborudovaniya-i-sredstv-avtomatiki-675/> Дата обращения: 05.08.2026.
6. ООО ПКБ «Петробалт». О компании. – URL: <https://petrobalt.ru/about-us/> Дата обращения: 05.08.2026.
7. АСКОН – вузам и колледжам: решения и образовательная программа. – URL: <https://edu.ascon.ru/main/institutes/> Дата обращения: 05.08.2026.
8. Цифровая платформа судостроения: АСКОН представил рабочую версию на «Морском конгрессе–Дальний Восток». 02.06.2026. RL: <https://ascon.ru/news/2026/06/02/cifrovaya-platforma-sudostroeniya-askon-predstavil-rabochuyu-versiyu-na-morskoy-kongresse-dalnj-vostok/> Дата обращения: 05.08.2026.
9. ПКБ «Петробалт» и колледж СПбГМТУ запустили совместный проект по 3D-моделированию судна-спасателя. 02.03.2026. – URL: <https://www.smtu.ru/ru/viewnews/1772/> Дата обращения: 05.08.2026.
10. Материалы совместного проекта «Подготовка инженерных кадров в формате «колледж – индустриальный партнер» для судостроительной отрасли». Колледж СПбГМТУ, ООО ПКБ «Петробалт», АО «АСКОН», 2026.
11. Лебедев Д.В., Новиков А.В. Формирование цифровых компетенций в АО «ОСК» // Судостроение. – 2022. – № 1 (860). – С. 11–14.
12. Khomchenko V.G., Gebel E. S., Peshko M.S. Educational robotics as part of the International Science and education project «Synergy» in realizing the social needs of society on the road to the industrial revolution «industry 4.0» // Austrian Journal of Political Science. – 2018. – Vol. 5. – No. 16. – P. 4. – DOI 10.4108/eai.30-1-2018.153816. ■

Скоростные катера и малотоннажные суда глиссирующего типа находят самое широкое применение в мире, причем не только в гражданских структурах, но в силовых, включая военно-морские силы, береговую охрану и др. Не является исключением использование скоростных катеров и судов силовыми структурами Российской Федерации.

Однако анализ состава энергетического оборудования скоростных катеров, создаваемых для силовых структур России, выявил устойчивую закономерность оснащения их энергетическим оборудованием исключительно зарубежного происхождения, причем из недружественных стран. Основной причиной, побудившей отечественных конструкторов использовать дизели зарубежных производителей, являлось отсутствие отечественных аналогов, которые по уровню технико-экономических характеристик были бы сопоставимы с зарубежными аналогами.

На сегодняшний день в отношении скоростных катеров ВМФ сложилась ситуация, когда эксплуатация построенных катеров затруднена из-за отсутствия поставок ЗИП, а строительство новых катеров – практически невозможное событие из-за отсутствия поставок легких высокооборотных дизельных двигателей.

В силу вышеизложенного остро стоит проблема импортозамещения дизельных двигателей скоростных катеров, для решения которой конструкторам необходимо оценить конечный результат, т.е. какими характеристиками будут обладать импортозамещенные двигатели и как это отразится на тактико-технических характеристиках скоростных катеров. Другими словами, требуется разработка расчетной математической модели и методики по обоснованию технико-экономических характеристик легких высокооборот-

МЕТОДИКА ОБОСНОВАНИЯ ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ЛЕГКИХ ВЫСОКООБОРОТНЫХ ДИЗЕЛЬНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ СКОРОСТНЫХ КАТЕРОВ ВМФ В УСЛОВИЯХ ИМПОРТОЗАМЕЩЕНИЯ

А.В. Довличарова, вед. инженер-конструктор АО «ЦМКБ «Алмаз»,
контакт. тел. (812) 373 2899, office@almaz-kb.ru

ных дизельных двигателей в условиях импортозамещения.

Опираясь на основы математического моделирования, изложенные в [1], была разработана методика обоснования технико-экономических характеристик дизельных двигателей. Исходя из определения методики как некоего готового алгоритма или процедуры проведения целенаправленных действий, методика была представлена в виде строго определенного пошагового алгоритма (рис. 1), реализация которого позволяет исследователю подобрать такое сочетание технико-экономических характеристик импортозамещаемых двигателей, которое в наибольшей степени удовлетворяло бы тактико-техническим характеристикам скоростных катеров ВМФ, причем в широком диапазоне водоизмещений – от 10 до 100 т и более.

Кроме того, реализация методики позволяет исследователям обосновать не только технико-экономические характеристики двигателей, но и определить наиболее предпочтительный способ их импортозамещения, выбрать промышленную площадку из множества возможных, где реализация мероприятий по импортозамещению будет

иметь наибольшую эффективность при минимальных затратах.

Достоинством реализации методики является получение возможности обоснования способов проектирования создания, а также налаживания серийного производства легких высокооборотных дизельных двигателей широкой линейки на основе одной размерности в мощностном диапазоне от 700 до 2000 кВт, на одной промышленной площадке, что позволяет обеспечивать широкий круг скоростных катеров ВМФ и других силовых структур РФ.

Так, в результате пошаговой реализации методики, расчетным путем было обосновано рациональное сочетание характеристик импортозамещаемых дизельных двигателей скоростных катеров ВМФ, представленное в табл. 1.

Таким образом, предложенная методика обоснования технико-экономических характеристик легких высокооборотных дизельных двигателей позволяет конструкторам решать важную и актуальную задачу их импортозамещения, что впоследствии будет способствовать продолжению серийного строительства скоростных катеров для ВМФ и других силовых структур и обеспечивать их эксплуатацию.

Таблица 1

Рациональное сочетание характеристик импортозамещенных двигателей скоростных катеров

Сущность способов импортозамещения	Исполнение двигателей и мощностной диапазон, кВт			Стоимость ОКР, млн. руб.
	V8	V12	V16	
ПАО «Автодизель» (ЯМЗ)				
Разработка типоряда ряда V8, V12, V16 на основе опытных (ОКР) образцов ЯМЗ-860	-	956–1471	-	1250,0
Характеристики двигателей				
Наименование характеристик	V8	V12	V16	Примечания
Размерность дизеля, см/см	145 / 172			Увеличен ход поршня по сравнению с ЯМЗ-855
Частота вращения, об/мин	2300			
Масса импортозамещенных двигателей, кг	-	3383	-	
Габаритные размеры, L×B×H, мм	-	2400×1320×1400	-	
Удельный расход топлива, г/(кВт·ч)	205			
Ресурс до капитального ремонта, ч	10 000			

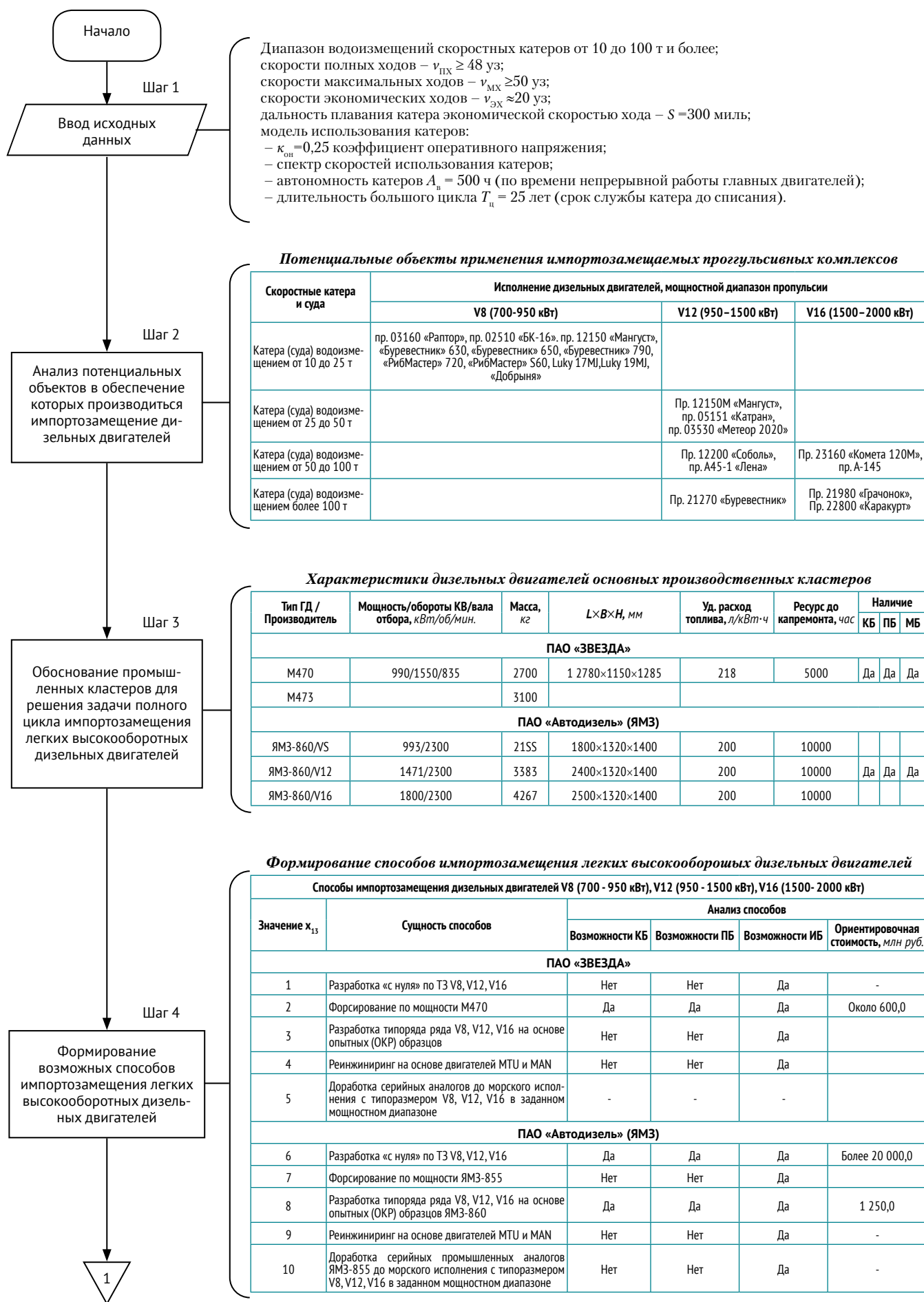


Рис. 1. Алгоритм методики обоснования технико-экономических характеристик легких высокооборотных дизельных двигателей скоростных катеров в условиях импортозамещения (начало)

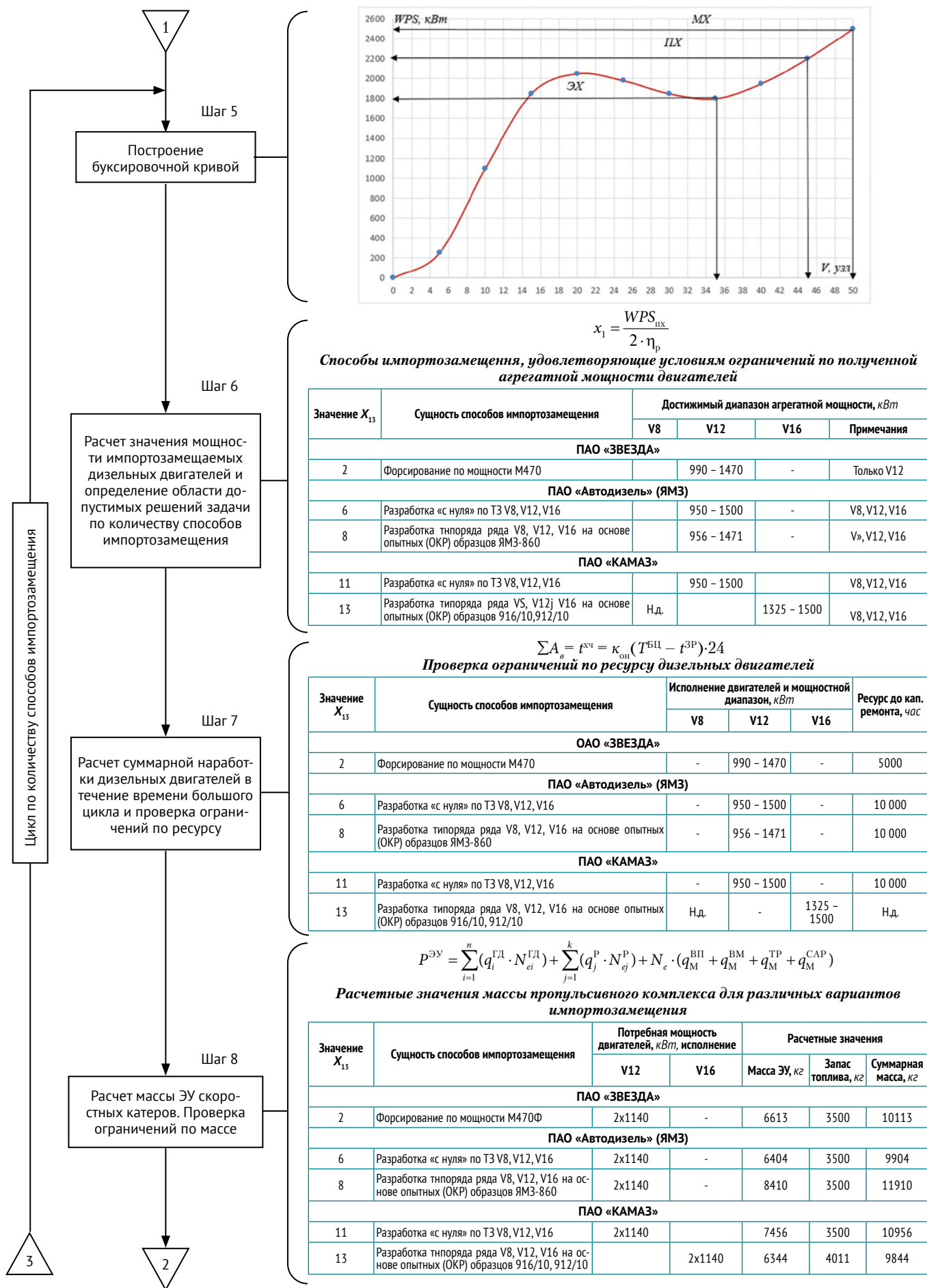


Рис. 1. Алгоритм методики обоснования технико-экономических характеристик легких высокооборотных дизельных двигателей скоростных катеров в условиях импортзамещения (продолжение)

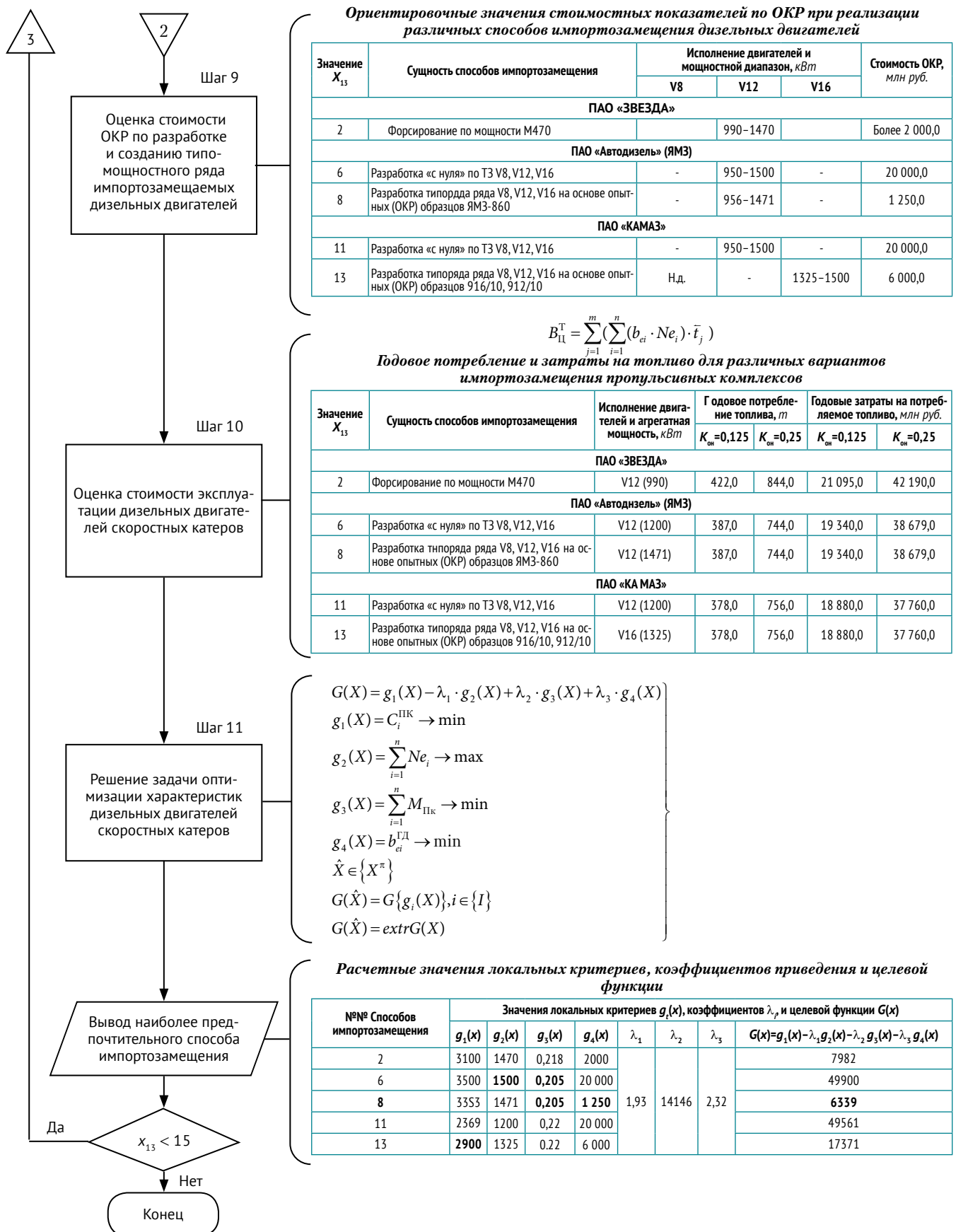


Рис. 1. Алгоритм методики обоснования технико-экономических характеристик легких высокооборотных дизельных двигателей скоростных катеров в условиях импортозамещения (окончание)

ЛИТЕРАТУРА

- Голубев К.Г., Барановский В.В., Домнин В.С., Довличарова А.В. Математическое моделирование технико-экономических характеристик легких высокооборотных дизельных двигателей, используемых в составе энергетических

характеристик скоростных катеров и судов, при решении задачи импортозамещения // Морской вестник. – 2026. – № 2(98). – С. 43–46. ■

Литий-ионный аккумулятор – это вторичный химический источник тока, получивший широкое распространение в современной мобильной технике. Создание высокомоощных литий-ионных аккумуляторов требует принципиально иного подхода, чем разработка высокоэнергетических изделий. Упор делается на способность отдавать высокий ток разряда (5–10 Сн и выше) без значительной потери емкости, перегрева и ускоренной деградации.

К современным тенденциям развития литий-ионных аккумуляторов следует отнести стремление к повышению их удельных энергетических и мощностных характеристик в сочетании с увеличенным ресурсом работы и длительным сроком хранения.

Основными проблемами работы аккумуляторов при повышенных токах является рост температуры и поляризации электродов, что накладывает особые требования на выбор конструкции и типа материалов, входящих в состав аккумуляторов, для обеспечения минимального внутреннего сопротивления. Этому способствует снижение толщины электродов и размера частиц активных материалов, применение токовыводов с минимальным сопротивлением.

В настоящей работе рассмотрены особенности конструкции высокомоощных литий-ионных аккумуляторов и применяемые в них материалы.

ТИПЫ И КОНСТРУКЦИЯ ВЫСОКОМОЩНЫХ ЛИТИЙ-ИОННЫХ АККУМУЛЯТОРОВ

Сегодня находят применение конструкции аккумуляторов двух типов: призматическая и цилиндрическая.

Конструкция блока электродов *призматических* аккумуляторов может быть рулонного типа или состоять из набора отдельных электродов (ламинированная конструкция) (рис 1).

Недостаток рулонной конструкции – низкий теплоотвод от электродов к корпусу аккумулятора, который осуществляется в основном через его узкий торец. Это приводит к сложностям при изготовлении аккумуляторов большой емкости при такой конструкции, а также высокомоощных аккумуляторов, рассчитанных на отдачу большого тока длительное время. Максимальный ток разряда таких аккумуляторов обычно не превышает 2 Сн.

Теплоотвод в конструкции, состоящей из отдельных электродов, также осуществляется в основном с торцов элект-

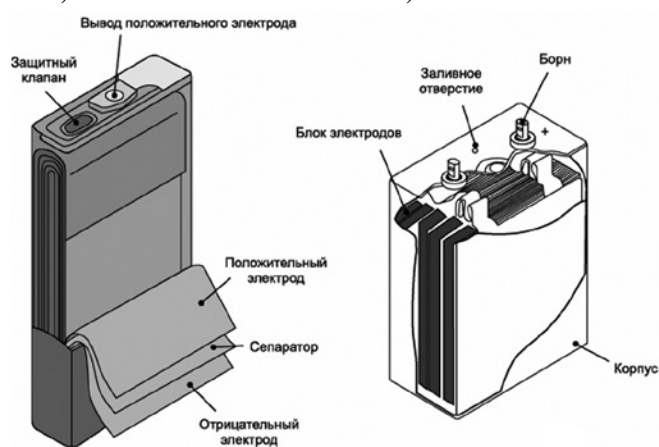


Рис. 1. Конструкции блока электродов: а – рулонная; б – из набора отдельных электродов

ОСОБЕННОСТИ СОЗДАНИЯ ВЫСОКОМОЩНЫХ ЛИТИЙ-ИОННЫХ АККУМУЛЯТОРОВ

С. В. Зайцев, канд. хим. наук, вед. науч. сотрудник,
М. М. Барсукова, канд. техн. наук, зам. начальника
научно-технического центра,

А. В. Ковальчук, канд. техн. наук, зам. ген. директора по научной работе,
ООО «НПП «Энергетический системы»,

М. Ю. Подалинский, студент ФПМИ МФТИ
(Национальный исследовательский университет),
контакт. тел. +7 (812) 339 9602, доб. 2075, 2051,
+7 (911) 220 2128, +7 (981) 965 8065

родов, поэтому для лучшего теплообмена электроды располагают как вдоль широкой стенки корпуса, так и поперек. Благодаря этому увеличивается площадь теплоотдачи. Аккумуляторы данной конструкции могут иметь высокую емкость и разряжаться токами до 15–20 Сн.

Общим недостатком аккумуляторов призматической конструкции является возможная деформация (вздутие) корпуса при повышенных температурах и длительном циклировании, особенно при высоких плотностях тока.

Призматические аккумуляторы всех видов конструкций могут быть выполнены как в металлическом корпусе, так и в мягком корпусе типа «pouch cell» (карман) из ламинированной фольги (рис. 2).



Рис. 2. Внешний вид аккумулятора в ламинированном корпусе

В последнем случае благодаря снижению механической прочности риск вздутия корпуса значительно повышается, что может привести к разгерметизации аккумулятора. По заявкам производителей [1] максимальный ток разряда данного типа аккумуляторов не превышает 5 Сн.

В *цилиндрической конструкции литий-ионных аккумуляторов* электродная сборка осуществляется путем намотки на тонкую бобину длинных лент электродов и сепарационного материала. Токовыводы в виде узких полос приваривают обычно к концам электродных лент, выпуская их с торца или с обоих торцов электродной сборки. Электродную сборку помещают в жесткий стальной корпус, изготовленный методом многопозиционной вытяжки. Герметизация осуществляется либо сваркой, либо завальцовкой крышки. В качестве изолятора применяются кольца из полимерных материалов, устойчивых к воздействию электролита и обладающих упругими свойствами. Отрицательный токовывод аккумулятора выводится на корпус, а положительный – на крышку.

Данная конструкция благодаря такому способу изготовления корпуса отличается прочностью и способна выдерживать без деформации повышенное внутреннее давление (рис. 3).

Достоинство цилиндрической конструкции – отсутствие изменения в объеме аккумулятора при длительном циклировании. К недостаткам данной конструкции следует отнести



Рис. 3. Устройство литий-ионного аккумулятора цилиндрической конструкции

относительную сложность равномерной намотки большого рулона и плохой теплоотвод, поэтому цилиндрические аккумуляторы емкостью более 50 А·ч обычно не выпускают. В общем случае электродная сборка осуществляется путем намотки на тонкую бобину длинных лент электродов и сепарационного материала.

В настоящее время в России и за рубежом выпускают цилиндрические аккумуляторы высокой мощности в широком диапазоне типонаименований. Из них наибольшее рыночное распространение имеют малогабаритные аккумуляторы типоразмеров 18650 и 26650. Максимальный ток разряда данных аккумуляторов обычно составляет 5–10 Сн.

В высокомоощных аккумуляторах и аккумуляторах большой емкости (более 20 А·ч) для улучшения условий токосъема (во избежание перегрева борнов) применяются винтовые борны, расположенные на крышках аккумуляторов (рис. 4).



Рис. 4. Устройство крышки цилиндрического высокомоощного литий-ионного аккумулятора

В крупногабаритных высокомоощных цилиндрических аккумуляторах герметизация осуществляется путем лазерной сварки верхней и нижней крышки к корпусу.

Для обеспечения электрических соединений с клеммами аккумулятора при монтаже аккумуляторной батареи токовыводы положительных и отрицательных электродов привариваются к контактным площадкам, расположенным через определенные интервалы на электродных лентах. Ширина контактных площадок определяется шириной токовыводов и зависит от требуемой величины рабочих токов (рис. 5).

Для снижения сопротивления в конструкции аккумуляторов могут быть использованы дополнительные элементы.

В компании Tesla улучшение теплоотвода с одновременным снижением сопротивления достигают за счет применения торцевых выступов-токовыводов, расположенных по всей длине лент положительных и отрицательных электродов и сформированных из непокрытой массой края токопроводящей подложки. Каждый токовывод приваривается соответственно к положительному и отрицательному токосъему (рис. 6).

Средствами обеспечения безопасности аккумуляторов в жестком корпусе служат предохранительные клапаны, встроенные в крышку аккумулятора, которые обеспечивают выпуск газов при превышении определенного внутреннего

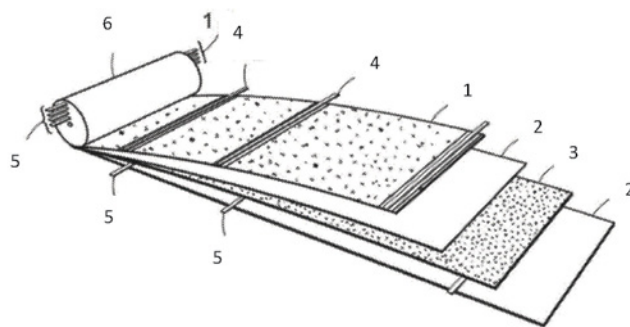


Рис. 5. Конструкция электродного блока с приварными токовыводами

1 – положительный электрод; 2 – сепаратор; 3 – отрицательный электрод; 4, 5 – токовыводы, приваренные к контактным площадкам; 6 – рулонный блок электродов

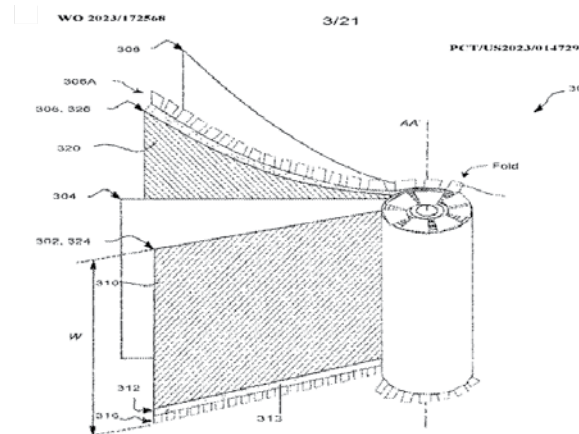


Рис. 6. Конструкция электродной сборки аккумуляторов Tesla 4680 [2]

давления. Обычно клапаны рассчитаны на срабатывание при давлении, превышающем 2,5 МПа.

ЭЛЕКТРОДНЫЕ МАТЕРИАЛЫ, ПРИМЕНЯЕМЫЕ В ВЫСОКОМОЩНЫХ ЛИТИЙ-ИОННЫХ АККУМУЛЯТОРАХ

Материалы положительного электрода. В высокотокковых литий-ионных аккумуляторах в качестве материала катода в настоящее время применяют литий-марганцевая шпинель LiMn_2O_4 , смешанные литированные оксиды $\text{LiNi}_x\text{Mn}_y\text{Co}_{1-x-y}\text{O}_2$, а также литированный фосфат железа LiFePO_4 .

Материалы на основе LiMn_2O_4 (LMO) относительно дешевы, но, несмотря на низкую токсичность, обладают низкой стабильностью (особенно при повышенных температурах) и имеют сравнительно невысокую фактическую удельную емкость. Указанные недостатки ограничивают применение данного материала в производстве коммерческих изделий.

В настоящее время LiFePO_4 (LFP) является одним из широко применяемых катодных материалов. Он характеризуется дешевизной, длительным сроком службы и высокой температурной стабильностью.

В то же время изделия, в которых используется данный материал, обладают более низким номинальным напряжением 3,2 В вместо классических 3,6 В.

На сегодняшний день наибольшее распространение получили высокомоощные аккумуляторы с катодами на основе соединений $\text{LiNi}_x\text{Mn}_y\text{Co}_{1-x-y}\text{O}_2$ (NMC). Данный тип материалов позволяет получить сбалансированное сочетание емкостных и токовых характеристик.

Традиционный LiCoO_2 в настоящее время практически не находит применения у мировых производителей высокомоощных аккумуляторов из-за невысокой термической стабильности, низкой пожаровзрывобезопасности и высокой стоимости.

Таблица 1
Характеристики катодных материалов

Материал	Характеристики	
	Напряжение, В	Удельная энергия, Вт·ч/кг
LiMn ₂ O ₄ (LMO)	3,7	490
LiFePO ₄ (LFP)	3,2	510
LiNi _x Mn _y Co _{1-x-y} O ₂ (NMC)	3,6	>740
LiCoO ₂ (LCO)	3,6	560

Сравнительные параметры катодных материалов представлены в табл. 1.

На сегодняшний день материалы типа NMC имеют следующие основные модификации: NMC111, NMC532, NMC622 и NMC811, отличающиеся соотношением трех элементов переходных металлов – Ni, Co и Mn. По мере увеличения содержания Ni повышается удельная емкость катодного материала и ресурс работы. В то же время термическая стабильность снижается, а показатели безопасности ухудшаются.

В табл. 2 представлены сравнительные характеристики материалов ряда NMC.

Таблица 2
Характеристики катодных материалов ряда NMC

Материал	Характеристики		
	Химический состав	Удельная разрядная емкость (мАч/г)	Количество циклов заряд-разряд
NMC111	LiNi _{1/3} Mn _{1/3} Co _{1/3} O ₂	146–158	~ 800
NMC532	LiNi _{0,5} Mn _{0,2} Co _{0,3} O ₂	155–172	~ 1000
NMC622	LiNi _{0,6} Mn _{0,2} Co _{0,2} O ₂	160–180	~ 1500
NMC811	LiNi _{0,8} Mn _{0,1} Co _{0,1} O ₂	180–220	~ 2000

Кроме того, материалы с высоким содержанием никеля требуют особых условий для хранения. Их следует хранить в вакууме или среде инертного газа, чтобы предотвратить реакцию с влагой и воздухом. На всех этапах процесса изготовления электродов также требуется жесткий контроль влажности.

Материал типа NMC111 является наиболее ранней разработкой из представленного ряда и в настоящее время имеет наименьшее распространение.

Материал типа NMC532 обеспечивает высокое сохранение емкостных характеристик в процессе циклирования, что важно для устройств, требующих сохранения высокой производительности в течение длительного времени. Данный материал обладает высокой термической стабильностью, длительным ресурсом работы и возможностью разряда при высоких плотностях тока. Меньшая чувствительность данного материала к влажности обуславливает повышение технологичности производства. Материал типа NMC532 обычно предпочитают за его исключительную термическую стабильность и безопасность, что делает его идеальным для устройств с повышенными требованиями к безопасности.

Материал типа NMC811 – это последняя разработка из серии материалов NMC. Он обладает наиболее высокой мощностью и стабильностью в процессе циклирования. Однако его низкая термическая стабильность требует сложных систем охлаждения и безопасности. В настоящее время ведутся работы по повышению термической устойчивости данного материала.

Главной отличительной особенностью катодного материала LiFePO₄ (LFP) является его более низкий потенциал относительно лития 3,2. Кроме того, данный материал обладает наибольшим сопротивлением по сравнению с другими типами катодных материалов и более низкой скоростью

диффузии лития. В связи с этим основным критерием при выборе типа данного материала для высокомоощных аккумуляторов является наименьший размер частиц.

Низкая проводимость данного материала требует повышенного содержания электропроводной добавки в составе активной массы положительного электрода.

Для работы при высоких токах содержание активного компонента в положительном электроде составляет около 75%, содержание токопроводящей добавки – 20% и 5% связующего [3]. Эти факты снижают удельные энергетические характеристики аккумуляторов с использованием LiFePO₄. Так, удельные характеристики аккумуляторов с катодным материалом типа NMC находятся в диапазоне 500–600 Вт·ч/л, а аккумуляторов с катодным материалом типа LFP составляют около 320 Вт·ч/л.

Материалы отрицательного электрода. В патентах и научно-технических публикациях предлагаются различные материалы и методы их получения, а также способы их модификации. К настоящему времени исследовано множество анодных материалов, включая графитообразный углерод, аморфный углерод, оксиды олова и др. Однако графитообразный углерод остается единственной доминантой на рынке. Основной объем исследовательских работ в этой области сосредоточен в настоящее время на изучении физических и химических свойств углеродных материалов разных вариантов и на сопоставлении этих свойств с интеркаляционными явлениями. Рассматриваются, например, варианты, содержащие разные добавки к углеродному материалу или введение тонкодисперсного кремния в углеродный материал.

Графиты, имеющие высокоупорядоченную кристаллическую структуру, привлекают достаточно высокой обратимой емкостью (300–370 мА·ч/г) и очень выгодным профилем изменения кривой напряжения в процессе разряда: большая часть лития деинтеркалируется в узком интервале потенциалов, что весьма важно для эксплуатационных параметров аккумулятора. Наиболее широкое распространение в качестве анодных материалов литий-ионных высокоточных аккумуляторов имеют синтетические графиты типа MСMB (мезоуглеродные микрогранулы) и природные графиты. Удельная разрядная емкость анодных материалов на основе MСMB составляет 320–330 мА·ч/г, а природных графитов – 350–360 мА·ч/г.

В настоящее время широкое применение получили анодные материалы на основе литированных титанатов, в особенности для аккумуляторов высокой емкости.

Титанат лития – кристаллическое соединение шпинельной структуры, состав которого обычно выражается как Li₄Ti₅O₁₂, или Li_{4/3}Ti_{5/3}O₄.

Теоретическая удельная емкость данного соединения – 175 мА·ч/г. Это примерно в 2 раза меньше, чем у графита. Тем не менее благодаря отсутствию объемных эффектов данный материал обеспечивает высокую циклируемость. В то же время электрохимический потенциал реакции внедрения – экстракции – лития составляет +1,5 В по отношению к паре Li⁺/Li против +0,2 В у графита. Соответственно, напряжение ячейки будет ниже: (2,4–2,5) В против (3,6–3,7) В для ячейки с графитовым анодом. С одной стороны, это означает явный проигрыш в удельной энергии, но, с другой – данное значение потенциала выше, чем потенциал восстановления компонентов электролита. Благодаря этому в технологии изготовления литий-ионных аккумуляторов можно исключить этап открытой формовки.

АНАЛИЗ ТЕХНИЧЕСКОГО УРОВНЯ ВЫСОКОМОЩНЫХ ЛИТИЙ-ИОННЫХ АККУМУЛЯТОРОВ ЗАРУБЕЖНОГО И ОТЕЧЕСТВЕННОГО ПРОИЗВОДСТВА

В настоящее время ассортимент высокомоощных литий-ионных аккумуляторов разной емкости весьма широк: от 1,0 до 50 А·ч.

Электродные материалы, рецептуры электролита, технологии и, как следствие, характеристики изделий у разных компаний значительно отличаются. Способность аккумулятора к разряду при повышенных плотностях токов при сохранении удельных энергетических характеристик обеспечивается в первую очередь типом катодного материала.

Наибольшее распространение среди высокомоощных аккумуляторов в настоящее время получили аккумуляторы цилиндрической конструкции.

В свою очередь основной объем промышленно выпускаемых изделий приходится на малогабаритные аккумуляторы габаритами 18650, 21700 и 26650. В данных аккумуляторах в качестве катодного материала применяется либо LiFePO_4 (LFP), либо материалы ряда $\text{LiNi}_x\text{Mn}_y\text{Co}_{1-x-y}\text{O}_2$ (NMC). В качестве анодного материала, как правило, используется природный или синтетический графит.

Разрядная емкость аккумуляторов в зависимости их типоразмера и типа используемых электродных материалов находится в диапазоне от 1,0 до 6,0 А·ч.

Максимальный ток разряда аккумуляторов с катодными материалами на основе NMC обычно составляет 10С, А·ч (рис. 7), а аккумуляторов с катодом на основе LFP он может достигать 30С, А·ч (рис. 8).

Как видно, аккумуляторы данных типов обеспечивают максимальные токи разряда при минимальном снижении емкости более или менее 10% от их номинального значения.

Следует отметить, что аккумуляторы большего диаметра – типоразмера 26650 – обеспечивают меньшие удельные мощностные характеристики из-за более низкого теплообмена с окружающей средой. Обычно их максимальный ток разряда составляет 5С, А·ч (рис. 9).

На сегодняшний день высокомоощные энергоемкие аккумуляторы (более 10 А·ч) в основном базируются на LFP катодных материалов или литированных титанатов в качестве анодных материалов.

Позиционируются аккумуляторы габаритами 4680 и 4695 с рабочим напряжением 3,6 В, графитовым анодом, но они находятся в процессе разработки. Исключение составляют аккумуляторы, производимые АО «Уралэлемент», модели ICR50/160, их характеристики представлены на рис. 10.

Данный аккумулятор с катодом на основе традиционного соединения LiCoO_2 обеспечивает полную номинальную емкость 20 А·ч при разряде током до 10С, А·ч.

МЕТОДЫ РАСШИРЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРНОГО ДИАПАЗОНА ЭКСПЛУАТАЦИИ ВЫСОКОМОЩНЫХ ЛИТИЙ-ИОННЫХ АККУМУЛЯТОРОВ

Проблема низкотемпературной работы литий-ионных аккумуляторов решают в первую очередь подбором состава

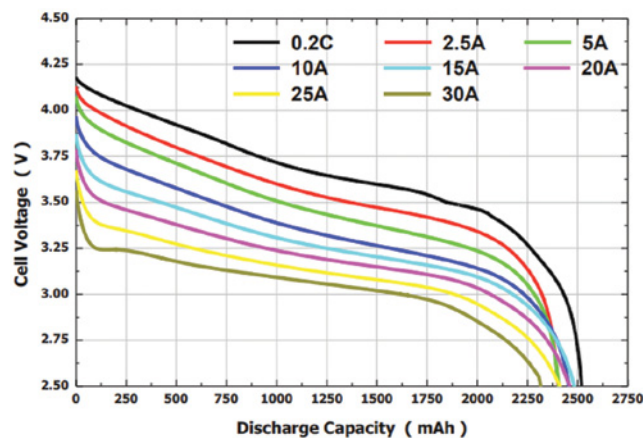


Рис. 7. Разрядные характеристики аккумулятора LG 18650 HE4 с катодом на основе NMC [4]

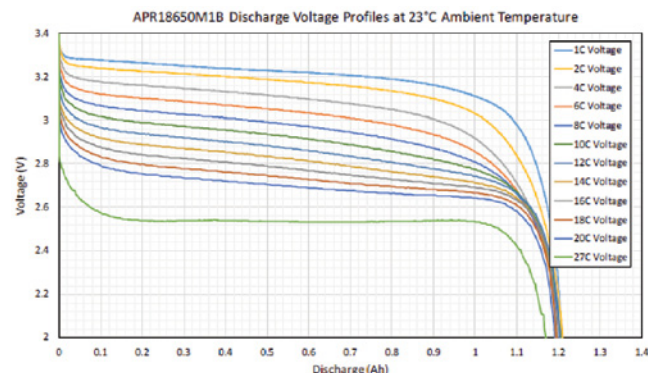


Рис. 8. Разрядные характеристики аккумулятора APR18650M1B компании Lithium Werks с катодом на основе LFP [5]

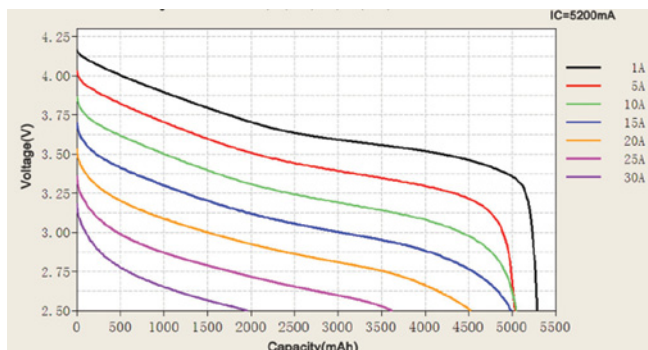


Рис. 9. Разрядные характеристики аккумулятора KeerPower IMR26650 с катодом на основе NMC [6]

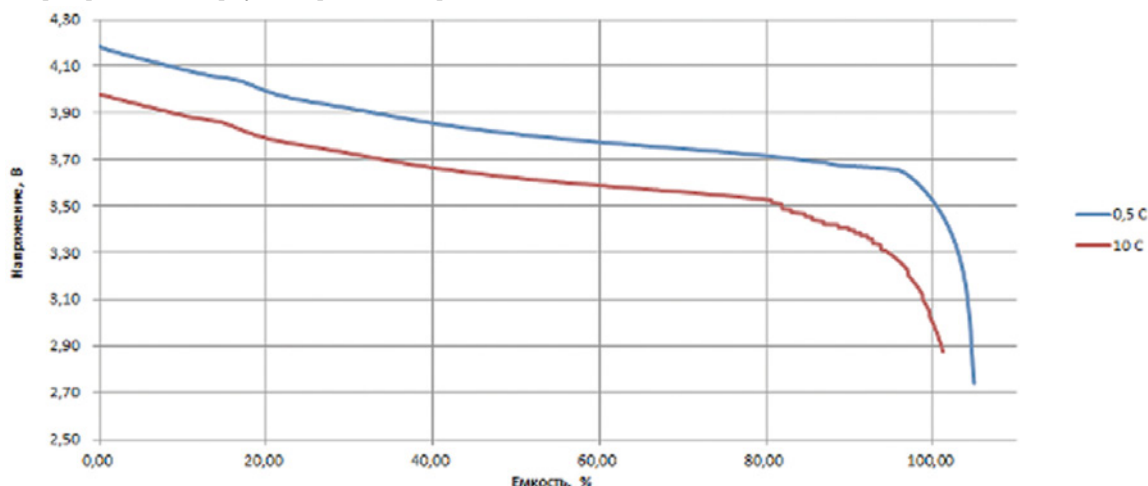


Рис. 10. Разрядные характеристики аккумулятора ICR50/160 [7]

электролита. Из многообразия низкотемпературных электролитов наиболее распространенным в настоящее время является трехкомпонентный электролит, представляющий собой 1М раствор соли гексафторфосфата лития LiPF_6 в смеси растворителей этиленкарбонат/диэтилкарбонат/диметилкарбонат (EC/DEC/DMC) в соотношении 1:1:1. Электролит данного состава стабилен при температурах от -40 до $+60$ °C и способен обеспечить работоспособность разрабатываемых аккумуляторов в требуемом температурном диапазоне при номинальных токах разряда.

В то же время соль LiPF_6 термически нестабильна и распадается в растворах при температурах выше 70 °C. При этом известно, что при разряде высокими токами до 10C даже в малогабаритных аккумуляторах типоразмера 18650 (с максимальным отношением площади поверхности к объему) температура в конце разряда может достигать 90 °C. Это приводит к быстрой деградации аккумуляторов.

Решением этой проблемы является замена LiPF_6 на другую более термически устойчивую соль. Альтернативной заменой могут служить термостабильные соли, такие как бис(трифторметансульфонил)имид лития (LiTFSi), бис(оксалато)борат лития $\text{Li}[\text{B}(\text{C}_2\text{O}_4)_2]$ (LiBOB), дифтор(оксалато)борат лития (LiDFOB).

На современном рынке материалов, предназначенных для применения в литий-ионных источниках тока, предлагаются готовые электролиты 1М раствор соли LiBOB в смеси растворителей EC/DEC/DMC 1:1:1. Также LiBOB предлагается как отдельное соединения для использования в качестве добавки к электролитам основного состава.

На рис. 11 представлены результаты циклирования электрохимических ячеек с катодом $\text{LiNi}_{1-x-y}\text{M}'_x\text{M}''_y\text{O}_2$ и электролитом LiBOB при повышенных температурах. Как видно, ячейка с электролитом на основе LiBOB показывает высокую стабильность в процессе циклирования даже при температуре 70 °C.

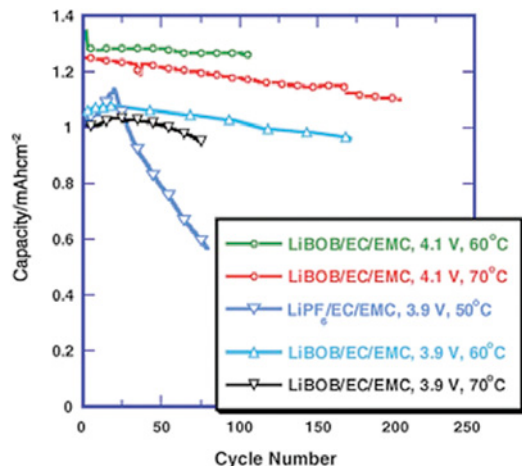


Рис. 11. Циклируемость литий-ионных элементов, содержащих электролит LiBOB/EC/EMC, при повышенных температурах [8]

Однако LiBOB обладает меньшей проводимостью, чем LiPF_6 , что отрицательно сказывается на возможности работы при пониженных температурах. Кроме того, LiBOB обладает нежелательной химической активностью с кобальтсодержащими материалами катода.

Наилучшими показателями обладают электролиты на основе соли LiBOB в источниках тока с катодами из литированного фосфата железа.

Использование LiBOB в качестве добавки к LiPF_6 -содержащему электролиту приводит к образованию более стабильного слоя на графите, противостояит неблагоприятным реакциям электролита с высоковольтными (NMC) по-

ложительными электродами, а также улучшает ресурсные характеристики.

Дифтор(оксалато)борат лития (LiDFOB) обладает теми же свойствами, но обеспечивает лучшую производительность при низкой температуре, чем LiBOB. Основными преимуществами этой соли – высокая ионная проводимость, хорошее пленкообразование, высокие температурные характеристики, хорошая совместимость с положительным электродом.

Сведения о коммерческом применении электролитов с использованием LiDFOB в качестве основной соли отсутствуют. При этом данное соединение широко применяется в качестве добавок к электролиту.

Использование этого соединения в качестве добавки в традиционный LiPF_6 -содержащий электролит приводит к улучшению работы литий-ионных аккумуляторов при повышенных токах разряда до 10C и, следовательно, при повышенных температурах (рис. 12).

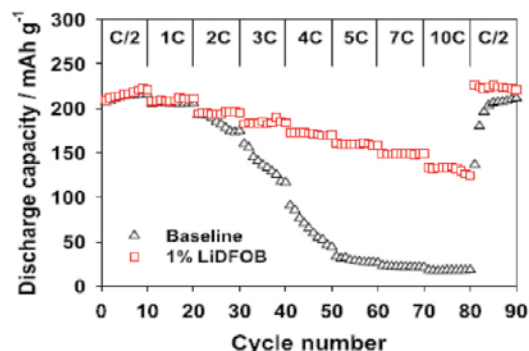


Рис. 12. Сравнение разрядных характеристик литий-ионных аккумуляторов с LiPF_6 -содержащим электролитом с добавкой и без добавки LiDFOB [9]

Таким образом, при разработке аккумуляторов, обладающих требуемыми характеристиками (работа при пониженных температурах и работа при повышенных токах разряда), требуется оптимизация состава электролита.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основе литературных данных рассмотрены методы повышения мощностных характеристик литий-ионных аккумуляторов.

Приведены основные типы конструкции и типы электродных материалов обеспечивающих работу аккумуляторов при повышенных плотностях токов разряда.

Указаны методы расширения диапазона рабочих температур за счет оптимизации состава электролита.

ЛИТЕРАТУРА

- https://www.ganfenglithium.com/pro3_detail_en/id/198.html
- Патент WO2023172568A2, США. PEI Allen, YANG Gang. Coated electrodes / Бюллетень ВОИС 37/2023 от 14.09.2023.
- Approaching Theoretical Capacity of LiFePO_4 at Room Temperature at High Rates / Huang H., Yin S.-C., Nazar L.F. // Electrochem. and Solid-State Lett. – 2001. – Vol.4. – P.170–172.
- [https://www.tokojelek.com/Technical Information of 18650HE4 \(2.5Ah\)](https://www.tokojelek.com/Technical Information of 18650HE4 (2.5Ah))
- <https://lithiumwerksbatteries.com/>
- <https://zapas-m.ru/High Drain Rechargeable Battery Datasheet Of KeepPower IMR26650 5200mAh>
- https://www.uralelement.ru/production/li_ion_cylindrical
- LiBOB: Is it an alternative salt for lithium ion chemistry? / Kang Xu, Sheng S. Zhang, Lee Unchul, Allen Jan L., Jow T. Richard. // Journal of Power Sources. – 2005. – Vol.146. – P. 79–85.
- Mechanisms for electrochemical performance enhancement by the salt-type electrolyte additive, lithium difluoro (oxalato)borate, in high-voltage lithium-ion batteries / Jiho Cha, Jung-Gu Han, Jaeseong Hwang, Jaephil Cho, Nam-Soon Choi. // Journal of Power Sources. – 2017. – Vol. 357. – P. 97–106. ■

Один из наиболее перспективных способов получения водорода на борту морского подводного объекта (МПО) – это риформинг дизельного топлива [1]. Преимущества этого способа получения водорода заключаются в удобной инфраструктуре береговых баз для МПО, существующих десятки лет, в доступности дизельного топлива и высокой взрывопожаробезопасности этого процесса. Один из недостатков такого получения водорода – наличие в продуктовом газе двуокиси углерода, негативно влияющего на работу топливных элементов электрохимического генератора. Объектом регулирования является абсорбер, входящий в энергетическую установку МПО [3].

ОСОБЕННОСТИ ДВИЖЕНИЯ ДВУХФАЗНОЙ СМЕСИ В ОБЪЕМЕ АБСОРБЕРА

В отличие от сатураторов, абсорбер имеет существенно больший объем и большую площадь проходного сечения для двухфазной смеси. Поэтому, если в сатураторах правомерно считать модель двухфазной газожидкостной смеси гомогенной с примерно одинаковыми скоростями жидкости и пузырьков газа, то в абсорбере подобная модель будет весьма грубой. Так, при вертикальном подъемном движении газожидкостной смеси в абсорбере пузырьки газа за счет сил Архимеда будут подниматься быстрее потока жидкости. Особенно явственно этот процесс будет наблюдаться с уменьшением массового расхода жидкости, т.е. при уменьшении скорости потока заборной воды.

Простейший безтарельчатый абсорбер для удаления углекислого газа из смеси конверсионного газа схематично представлен на рис. 1. На вход абсорбера сбоку по входному патрубку подаются смесь заборной воды, частично насыщенной углекислым газом, и пузырьки, заполненные конверсионным газом. В объеме абсорбера реализуется барботажный режим движения двухфазной смеси, когда при относительно низких скоростях воды пузырьки поднимаются независимо друг от друга в близком контакте.

Характеристиками барботажного режима движения являются скорость подъема газовых пузырьков, удельная поверхность контакта фаз, объемное газосодержание, средний диаметр пузырька. Перечисленные характеристики определяют гидродинамику и массопередачу в объеме абсорбера.

Теоретической основой математического описания процессов переноса в двухфазных средах являются фундаментальные законы сохранения и равновесия. Известны несколько подходов к описанию закономерностей движения двухфазных сред [4], например, модель:

ОСНОВНЫЕ ПОКАЗАТЕЛИ РАБОТЫ АБСОРБЕРА СИСТЕМЫ ОЧИСТКИ ГАЗА

А.В. Балакин, канд. техн. наук, доцент, начальник отдела,
А.Н. Дядик, д-р техн. наук, проф., вед. науч. сотрудник,
М.В. Ларионов, начальник лаборатории,
 АО «Концерн «НПО «Аврора»,
Д.С. Маловик, канд. техн. наук, мл. науч. сотрудник,
 ВУНЦ ВМФ «ВМА им Н.Г. Кузнецова»,
 контакт. тел. (812) 714 1641, +7 (965) 763 2324

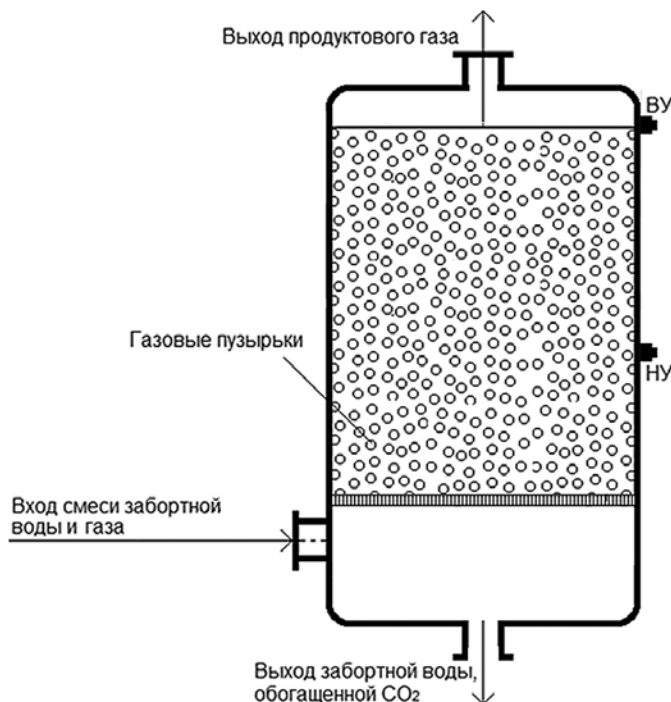


Рис. 1. Принципиальная схема абсорбера
 ВУ – верхний уровень; НУ – нижний уровень

- гомогенного течения;
- раздельного (гетерогенного) течения;
- потока дрейфа.

Можно также предположить, что в объеме абсорбера формируется двухфазная смесь, которая по своей структуре может быть классифицирована как газовая эмульсия. Основными характеристиками такой эмульсии являются газосодержание, дисперсный состав (распределение пузырьков газовой фазы по размерам и объемам) и химический состав газовой фазы.

Таким образом, на вход абсорбера поступает двухфазная смесь, включающая несущую среду – заборную воду и пузырьки конверсионного газа, состоящего из смеси водорода, углекислого газа и окиси углерода. Соотношение компонентов конверсионного газа изменяется за счет поглощения водой части углекислого газа (в количестве ~75%), причем масса водорода и окиси углерода остается неизменной, так как практически не они растворяются в воде. Разница между физическими

процессами в сатураторах и абсорбере заключается не только в модели двухфазного течения, но и в интенсивности поглощения углекислого газа заборной водой. При больших скоростях в сатураторах реализуется в основном процесс конвективной диффузии, при котором около 75% углекислого газа растворяется в заборной воде, в то время как в абсорбере реализуется процесс молекулярной диффузии – менее интенсивный, чем процесс в сатураторах. Снижается и движущая сила массопередачи, поскольку концентрация CO_2 в конверсионном газе уменьшается, а концентрация в заборной воде растет.

Структура и характер распределения фаз в газовой эмульсии оказывают существенное влияние на особенности протекания процессов взаимодействия между фазами. Особенности структуры двухфазного потока влияют на такие его характеристики, как гидродинамические потери давления, потери энергии из-за механического взаимодействия фаз. Кроме того, распространения воз-

мушений в двухфазном потоке также определяются его структурой.

Даже при малых расходах сред распределение пузырьков не является равномерным, причем диаметр образующихся пузырьков не стабилен и характеризуется большим спектром размеров. В процессе подъема возможно дробление и слияние пузырьков, причем могут образовываться отдельные комплексы пузырьков, поднимающиеся со скоростью, существенно превышающую скорость свободного всплытия отдельных пузырьков.

Применительно к процессам, имеющим место в объеме абсорбера, необходимо обеспечить развитую турбулентность за счет всплывающих пузырьков, чтобы критерий Рейнольдса был выше 800. Однако следует помнить, что при критериях Рейнольдса более 200 пузырек теряет сферическую форму и принимает форму сплюсненного эллипсоида, короткая ось которого расположена в направлении движения.

В соответствии с [4], границы существования различных форм пузырьков можно определить графически, как это следует из рассматриваемого рис. 2. Определение границ различных форм пузырьков различаются с использованием критериев подобия.

Критерий Этвеша, характеризующий отношение сил гравитации и поверхностного натяжения,

$$Eo = \frac{g d_n^2 (\rho_{ж} - \rho_{г})}{\sigma_{ж}} \quad (1)$$

Критерий Моргана, зависящий только от физических характеристик фаз

$$Mo = \frac{g \mu_{ж}^4 (\rho_{ж} - \rho_{г})}{\rho_{ж}^2 \sigma_{ж}^3} \quad (2)$$

Критерий Рейнольдса, характеризующий режим всплытия газовых пузырьков в жидкости

$$Re = \frac{v_{п} d_{п}}{\nu_{ж}}, \quad (3)$$

где $v_{п}$ – скорость всплытия газового пузырька, м/с; $\nu_{ж}$ – кинематический коэффициент вязкости жидкости, м²/с; $\mu_{ж}$ – динамический коэффициент вязкости жидкости, Па·с; $d_{п}$ – диаметр газового пузырька; $\sigma_{ж}$ – коэффициент поверхностного натяжения жидкости, Н/м; $\rho_{ж}$, $\rho_{г}$ – плотности жидкости и газа, кг/м³; g – ускорение свободного падения, м/с².

Область изменения критериев Re , Eo , Mo разбита на три зоны, определяющие три типа формы пузырька. Если точка, соответствующая заданным значениям критериев Eo , Mo , находится в зоне I, пузырек будет иметь сферическую форму, в зоне II – эллипсоидальную форму, в зоне III – иметь форму колпачка.

Разнообразие форм пузырей, режимов, гидродинамических и геометрических форм каналов делает важным создание единой методики расчета процесса барботажного всплытия одиночного пузыря с опорой на надежные экспериментальные данные и имеющиеся полуматематические критерияльные зависимости. Подобный подход позволяет выявить объективную картину всплытия пузыря и режимы работы абсорбера.

АЛГОРИТМ РАСЧЕТА ТЕМПЕРАТУРЫ СМЕСИ В ОБЪЕМЕ АБСОРБЕРА

Для начала определяется коэффициент распределения, или константа фазового равновесия при постоянной температуре и давлении

$$m = \frac{E}{p} = \frac{3,45 \times 10^8}{p} \quad (4)$$

где $E = 3,45 \cdot 10^8$ Па – постоянная Генри; p – абсолютное давление в абсорбере, Па.

Конверсионный газ, поступающий в абсорбер, включает в свой состав водород H_2 , окис углерода CO и углекислый газ CO_2 со своими мольными долями μ_{H_2} , μ_{CO} , μ_{CO_2} . Тогда молекулярная масса смеси трех газов на входе в абсорбер будет

$$M_r^{см} = \mu_{H_2} M_{H_2} + \mu_{CO_2} M_{CO_2} + \mu_{CO} M_{CO} \quad (5)$$

где M_{H_2} , M_{CO_2} , M_{CO} – молекулярные массы водорода, углекислого газа и окиси углерода.

Составы газа и жидкости выражены в относительных массовых концентрациях, поэтому коэффициент распределения умножается на поправочный множитель:

$$\bar{m} = m \frac{M_{ж}}{M_r^{см}} \quad (6)$$

где $M_{ж} = 18$ – молекулярная масса воды.

Объемный расход смеси газов на входе в абсорбер

$$V_r = V_r^{нф} \frac{p_{атм}}{p_{абс}} \quad (7)$$

где $V_r^{нф}$ – объемный расход конверсионного газа при нормальных физических условиях; $p_{атм}$ – атмосферное давление, Па; $p_{абс}$ – абсолютное давление в абсорбере, Па.

Плотность газовой смеси в пузырьках

$$\rho_r = \frac{G_r}{V_r} \quad (8)$$

где G_r – массовый расход газа на входе в абсорбер, кг/с; V_r – объемный расход газа на входе в абсорбер, м³/с.

Необходимо задаться объемным $Q_{ж}$ (массовым $G_{ж}$) расходом жидкости на входе в абсорбер. Величина этого расхода определяется производительностью насосов заборной воды МПО.

Массовое расходное газосодержание на входе в абсорбер

$$x_{вх} = \frac{G_r}{G_r + G_{ж}} \quad (9)$$

Массовые доли газов в смеси:

$$\begin{aligned} - \text{водорода } g_{H_2} &= \frac{G_{H_2}}{G_{см}}; \\ - \text{углекислого газа } g_{CO_2} &= \frac{G_{CO_2}}{G_{см}}; \\ - \text{окиси углерода } g_{CO} &= \frac{G_{CO}}{G_{см}}. \end{aligned}$$

Изобарная теплоемкость газовой смеси

$$C_p^r = g_{H_2} C_p^{H_2} + g_{CO_2} C_p^{CO_2} + g_{CO} C_p^{CO} \quad (10)$$

Изобарная теплоемкость двухфазной жидкости в абсорбере

$$C_p^{см} = x_{ж} C_p^r + (1 - x_{ж}) C_p^{ж} \quad (11)$$

Температура смеси в объеме абсорбера

$$T_{см} = x_{вх} \frac{C_p^r}{C_p^{см}} T_r + (1 - x_{вх}) \frac{C_p^{ж}}{C_p^{см}} T_{ж} \quad (12)$$

Далее все характеристики жидкости и газа принимаются по температуре двухфазной смеси в объеме абсорбера.

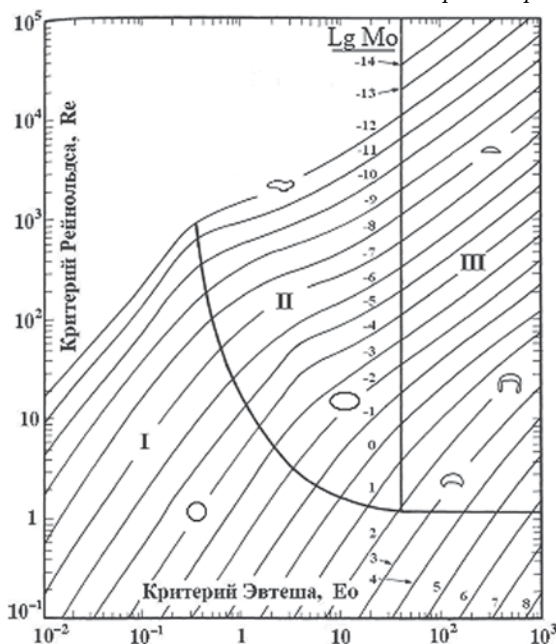


Рис. 2. Границы существования различных форм пузырьков, поднимающихся в объеме абсорбера, в зависимости от критериев подобия

ОПРЕДЕЛЕНИЕ СТЕПЕНИ ИЗВЛЕЧЕНИЯ УГЛЕКИСЛОГО ГАЗА В АБСОРБЕРЕ

Для расчета скорости всплытия деформированных пузырьков, в предположении о независимости скорости всплытия v_n от диаметра всплывающих пузырьков (при $Re > 600$), наиболее близкое совпадение с экспериментальными данными дает использование зависимости [5]

$$w_n = 1,01 \left(\frac{\sigma_j^2}{\mu_j \rho_j} \right)^{0,2}. \quad (13)$$

Диаметр всплывающего устойчивого газового пузырька в жидкости абсорбера задается. При этом вводится предположение, что при переходе газожидкостной смеси из патрубка в абсорбер пузырьки сохраняют свой размер d_n .

Динамический коэффициент вязкости смеси газов можно определить по формуле Фроста

$$\mu_r^{cm} = T_{cm} (6,6 - 2,25 \lg M_r^{cm}) \times 10^{-8}. \quad (14)$$

Критерий Рейнольдса для газового пузырька

$$Re_r = \frac{w_n d_n \rho_r}{\mu_r^{cm}}. \quad (15)$$

Коэффициент диффузии углекислого газа в газовой фазе

$$D_r = \frac{4,3 \times 10^{-7} T_r^{\frac{3}{2}}}{p \left(V_{CO_2}^{\frac{1}{3}} + V_{cm}^{\frac{1}{3}} \right)^2} \sqrt{\frac{1}{M_{CO_2}} + \frac{1}{M_r^{cm}}}, \quad (16)$$

где p – абсолютное давление кг·с/см²; V_{CO_2} , V_{cm} – молярные объемы газов, см³/моль для CO_2 и газовой смеси соответственно; M_{CO_2} , M_r^{cm} – молярные массы газов соответственно 44 кг/кмоль и 7,65 кг/кмоль; V_{CO_2} и V_{cm} определяются из таблиц [6]; $\dot{V}_{CO_2} = 34$ см³/моль; $V_{cm} = V_{H_2} \cdot \mu_{H_2} + V_{CO_2} \cdot \mu_{CO_2} + V_{CO} \cdot \mu_{CO}$.

Критерий Прандтля для газа

$$Pr_r = \frac{\mu_r^{cm}}{D_r \rho_r}. \quad (17)$$

Диффузионный критерий Нуссельта для газовой фазы

$$Nu_r = 0,407 Re_r^{0,655} Pr_r^{0,333}. \quad (18)$$

Коэффициент массоотдачи для газа

$$\beta_r = \frac{Nu_r D_r}{d_n}. \quad (19)$$

Площадь проходного сечения абсорбера

$$f_{abc} = 0,785 d_{abc}^2, \quad (20)$$

где d_{abc} – диаметр абсорбера.

Скорость жидкости в абсорбере без учета затесненности проходного сечения газовыми пузырьками

$$w_j = \frac{Q_j}{f_{abc}}. \quad (21)$$

Коэффициент скольжения газовых пузырей относительно жидкости

$$\Pi = \frac{w_r}{w_j}. \quad (22)$$

Расходное объемное газосодержание на входе в абсорбер для гетерогенного потока двухфазной смеси

$$\varphi = \frac{1}{1 + \frac{1 - x_{вх}}{x_{вх}} \Pi \cdot \frac{\rho_r}{\rho_j}}. \quad (23)$$

Эквивалентный диаметр абсорбера

$$d_{эвб} = d_{abc} \sqrt{(1 - \varphi)}. \quad (24)$$

Критерий Рейнольдса для жидкости в абсорбере

$$Re_j = \frac{w_j d_{эвб}}{\nu_j}, \quad (25)$$

где ν_j – кинематический коэффициент вязкости жидкости.

Коэффициент диффузии углекислого газа в жидкой фазе

$$D_j = \frac{1 \times 10^{-6}}{A \cdot C \sqrt{\mu_j} \left(V_{CO_2}^{\frac{1}{3}} + V_j^{\frac{1}{3}} \right)^2} \sqrt{\frac{1}{M_{CO_2}} + \frac{1}{M_j}}, \quad (26)$$

где A и C – коэффициенты, зависящие от свойств растворенного вещества и растворителя, для газов: $A = 1$, для воды $C = 4,7$; $V_j = 18,9$ см³/моль – молярный объем воды; $M_j = 18$ кг/моль – молярная масса воды.

Критерий Прандтля для жидкости

$$Pr_j = \frac{\mu_j}{D_j \rho_j}. \quad (27)$$

Диффузионный критерий Нуссельта для жидкой фазы

$$Nu = 0,0021 Re_j^{0,75} Pr_j^{0,5}. \quad (28)$$

Приведенная толщина пленки жидкости

$$\theta_{пр} = \left(\frac{\mu_j^2}{\rho_j^2 g} \right)^{0,333}. \quad (29)$$

Коэффициент массоотдачи для жидкой фазы

$$\beta_j = \frac{Nu_j D_j}{\theta_{пр}}. \quad (30)$$

Коэффициент массопередачи между газом и жидкостью

$$K_{r-j} = \frac{1}{\frac{1}{\beta_r} + \frac{\bar{m}}{\beta_j} \left(\frac{\rho_r}{\rho_j} \right)}. \quad (31)$$

Объем одного газового пузырька в абсорбере

$$V_{1n} = \frac{\pi d_n^3}{6}. \quad (32)$$

Число пузырьков в объеме абсорбера

$$n_n = \frac{V_{abc} \varphi}{V_{1n}} = \frac{0,785 d_{abc}^2 L_{abc} \left(\frac{\varphi}{2} \right)}{V_{1n}}. \quad (33)$$

Площадь поверхности одного газового пузырька

$$f_{1n} = \pi d_n^2. \quad (34)$$

Суммарная поверхность всех пузырьков в объеме абсорбера

$$f_{1n}^{сум} = f_{1n} n_n. \quad (35)$$

Масса углекислого газа, перешедшего из смеси газов в жидкость, в объеме абсорбера

$$M_{CO_2} = (C_{CO_2}^{г, вх} - C_{CO_2}^{г, вых}) V_{CO_2} = (C_{CO_2}^{г, вх} - C_{CO_2}^{г, вых}) V_{abc} \varphi, \quad (36)$$

где $C_{CO_2}^{г, вх}$, $C_{CO_2}^{г, вых}$ – концентрации углекислого газа в смеси на входе и выходе абсорбера. Концентрация углекислого

газа в жидкости на выходе абсорбера

$$C_{CO_2}^{ж, вых} = C_{CO_2}^{ж, вх} + \frac{M_{CO_2}}{0,785 d_{abc}^2 L_{abc} (1 - \varphi)}, \quad (37)$$

где $C_{CO_2}^{ж, вх}$ – концентрация углекислого газа в жидкости на входе в абсорбер.

Расход поглощенного углекислого газа водой в абсорбере

$$W_{CO_2} = K_{r-j} f_{1n}^{сум} (C_{CO_2}^{г, вх} - C_{CO_2}^{ж, вх}). \quad (38)$$

Массовый расход углекислого газа на выходе абсорбера

$$G_{CO_2}^{вых} = G_{CO_2}^{вх} - W_{CO_2}. \quad (39)$$

Степень извлечения углекислого газа в абсорбере

$$\eta = \frac{G_{CO_2}^{вх} - G_{CO_2}^{вых}}{G_{CO_2}^{вх}}. \quad (40)$$

Суммарное гидравлическое сопротивление абсорбера

$$\Delta p_{abc} = \Delta p_{вх} + \Delta p_{пл} + \Delta p_{2ф} + \Delta p_{вых}, \quad (41)$$

где $\Delta p_{вх}$ – сопротивление входной части трубы; $\Delta p_{пл}$ – сопротивление поворота потока; $\Delta p_{2ф}$ – сопротивление двухфазного потока; $\Delta p_{вых}$ – сопротивление выхода абсорбера.

РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ АБСОРБЕРА

Система уравнений (4) – (41) представляет собой алгоритм решения статической задачи растворимости углекислого газа в заборной воде и расчета гидравлического сопротивления абсорбера морского подводного объекта.

В расчетах предполагалось, что расход углекислого газа на входе в абсорбер принимался одинаковым для трех значений расхода заборной воды. Кроме того, соотношение массовых долей газов в смеси трех газов также принималось равным этой величине на входном патрубке в абсорбер. В этом случае коэффициент массоотдачи для газа β_r также был приблизительно постоянным.

В табл. 1 приведены отдельные результаты расчета в рамках реализации цифрового двойника абсорбера для относительных значений расхода заборной воды, равных 1,0; 0,66 и 0,33 при заборной температуре +30 °С.

Как следует из рассмотрения данных, приведенных в табл. 1, начиная с 66% от максимального массового расхода заборной воды, степень извлечения углекислого газа из смеси газов составляет 100%, т. е. к топливным элементам электрохимического генератора (ЭХГ) будет поступать водород без двуокиси углерода. Также стоит отметить, что вся двуокись углерода будет растворяться в заборной воде и нет опасения проскока пузырьков углекислого газа за пределы МПО. Следует отметить, что расчеты выполнялись для достаточно высокой температуры заборной воды +30 °С. С понижением температуры процесс растворения углекислого газа в заборной воде будет проходить более интенсивно,

Основные результаты расчета абсорбера для трех величин расхода заборной воды при температуре заборной воды +30 °С

Относительный расход воды	Кэфф. массоотдачи для газа, β_g , м/с / Коэффициент скольжения газа относительно жидкости	Кэфф. массоотдачи для жидкости $\beta_{ж}$, м/с / Гидравлическое сопротивление абсорбера, МПа	Кэфф. массо-передачи между газом и жидкостью $K_{г-ж}$, м/с	Число газовых пузырьков в объеме абсорбера, шт.	Поверхность массо-передачи, m^2 / Диффузионный критерий Нуссельта для жидкости	Степень извлечения CO_2 из смеси газов в абсорбере q , %
0,33	0,00727/6,6	0,041/0,0016	0,00459	9185	2,884/26,8	87
0,66	0,00732/3,3	0,0688/0,0069	0,0053	9226	2,897/45	100
1,0	0,00709/2,19	0,0936/0,0152	0,00553	8406	3,0/61,22	100

что потребует меньших величин расхода воды и снизит требования к мощности насоса. При этом гидравлическое сопротивление абсорбера остается довольно низким, что также снижает требования к напорным характеристикам насоса, а следовательно, и к его мощности.

Табличные данные были проиллюстрированы графически и изображены на рис. 3. Графическое представление изменяющихся величин, характеризующих работу абсорбера, позволяет правильно выбирать необходимые расходы заборной воды для полного растворения углекислого газа и выведения его из контура топливного процессора ВНЭУ. Если нарушить соотношение расходов конверсионного газа и заборной воды, то может возникнуть проблема, вызванная наличием углекислого газа в продуктом газе с дальнейшим выходом его к топливным элементам ЭХГ, что создаст предпосылки для карбонизации электролита и необходимости его кондиционирования. Карбонизация электролита вызывает снижение характеристики батареи топливных элементов и ухудшение работоспособности. Основной причиной

снижения напряжения на клеммах является образование осадка (визуально наблюдаемого при дефектации батарей топливных элементов) карбонатных солей калия (K_2CO_3) на катоде.

Выпадение K_2CO_3 блокирует газовые поры и даже газовые коллекторы, ограничивая доступ кислорода к катализатору.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Абсорбер как элемент комплексной очистки конверсионного газа от вредной составляющей, какой является углекислый газ, представляет собой вместительную емкость с двухфазным подъемным движением среды пузырьковой структуры. С одной стороны, кажущаяся простота устройства абсорбера сочетается с достаточно сложным автоматическим регулированием уровня в его объеме. Причем это связано не только с динамикой всей трубопроводной системы подвода и отвода заборной воды и, соответственно с разработкой алгоритмов управления арматурой, но и с колебаниями уровня в абсорбере при качке, кренах и дифферентах.

Для регулирования уровня в абсорбере в безопасных пределах в его составе предусмотрены датчики верхнего и нижнего уровня. Срабатывание этих датчиков приводит к формированию сигналов на открытие или закрытие соответствующих клапанов в системе подвода заборной воды и отвода продуктового газа.

Реализация данных алгоритмов управления невозможна без анализа физических процессов, протекающих в объеме абсорбера и представленных в настоящей работе. В основе математического описания физико-химических процессов в абсорбере лежат фундаментальные зависимости для модели конвективной и молекулярной диффузии водорода с растворением его в жидкой фазе. Расчетным путем установлено, что с увеличением расхода заборной воды можно добиться полного растворения диоксида углерода в абсорбере. Однако этот вывод требует экспериментальной проверки на стенде.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ченцов М.С., Соколов В.С., Прохоров Н.С. Концепция установки получения водорода риформингом дизельного топлива в составе атмосферонезависимой энергетической установки с электрохимическими генераторами для неатомной подводной лодки // Альтернативная энергетика и экология. – 2006. – №11 – С. 39 – 46.
2. Упрощенная имитационная модель топливного процессора в составе воздушонезависимых энергетических установок / Балакин А.В., Дядик А.Н., Кармазин А.С., Ларионов М.В., Сурин С.Н. // Морские интеллектуальные технологии. – 2020. – Т. 1. – №4 (50). – С. 244 – 249.
3. Цифровой двойник сатуратора системы очистки газа / Балакин А.В., Богданов Д.С., Дядик А.Н., Ларионов М.В., Сурин С.Н. // Системы управления и обработки информации: науч.-техн. сб. / АО «Концерн «НПО «Аврора». – 2022. – Вып. 4 (59). – С. 16 – 26.
4. Clift R., Grace J.R., Weber M.E. Bubbles, drops, and particles. – New York, 1978. – 380 p.
5. Бершадский В.А. Испытания с имитацией эксплуатационных условий подачи криогенных компонентов топлива при отработке ракетных двигательных установок. – Дисс. на соискание уч. степени д-ра техн. наук. – Сергиев Посад, НИИ-ХИММАШ, 2001. – 256 с.
6. Лаптев А.Г. Модели пограничного слоя и расчет тепломассообменных процессов. – Казань: Изд-во Казанского ун-та, 2007. – 500 с. ■

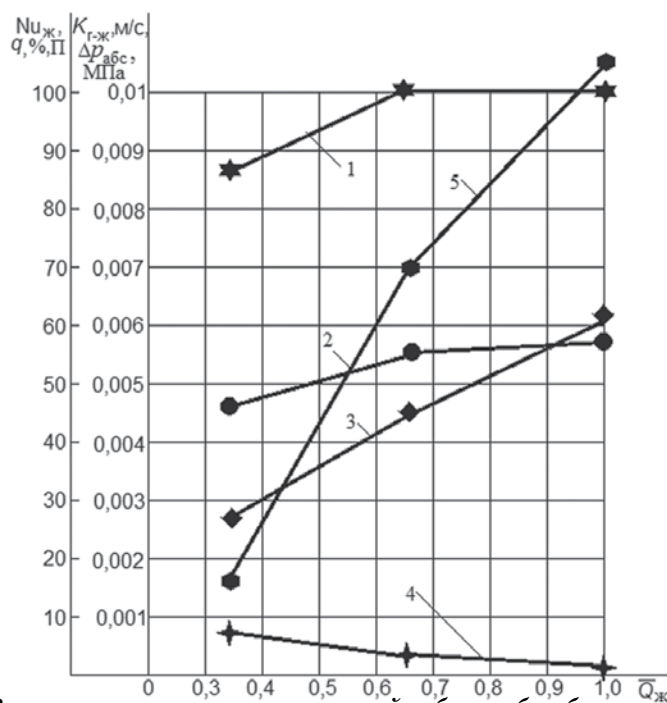


Рис. 3. Зависимость основных показателей работы абсорбера от относительного расхода жидкости
1 – q , 2 – $K_{г-ж}$, 3 – $Nu_{ж}$, 4 – Π , 5 – $\Delta p_{абс}$

При эксплуатации систем компенсации постоянных магнитных полей корабельных корпусных конструкций, особенно на этапе их пусконаладочных работ, значительное внимание уделяется проверке направлений токов в компенсационных обмотках. Проверка эта не требует специальных знаний, она базируется на известном «правиле буравчика» (рис. 1) и «опыте Эрстеда» (рис. 2), осуществляется с помощью ручного магнитного (стрелочного) компаса в соответствии со следующей типовой последовательностью:

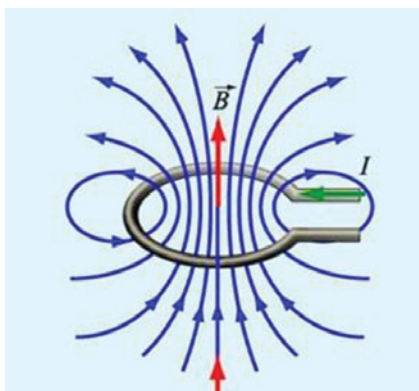


Рис. 1. Правило буравчика

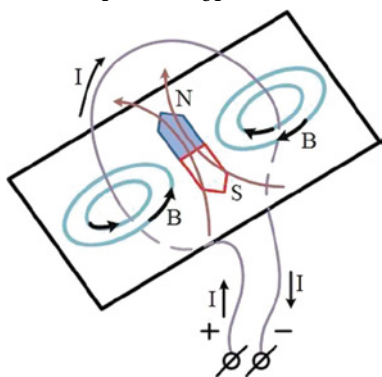


Рис. 2. Опыт Эрстеда

а) с помощью аппаратуры управления в каждой обмотке устанавливают условное положительное значение тока, близкое к номинальной величине;

б) проверяют направление тока в широтной обмотке, которое должно быть против часовой стрелки, если смотреть на витки обмотки со стороны кормы корабля в нос; при этом северный конец стрелки компаса должен отклоняться в корму;

в) проверяют направление тока в батоксовой обмотке, которое должно быть против часовой стрелки, если смотреть на обмотку от правого борта к левому; при этом северный конец стрелки компаса должен отклониться к правому борту;

г) проверяют направление тока в горизонтальной обмотке, которое должно быть против часовой стрелки, если смотреть на обмотку сверху; при этом северный конец стрелки компаса, помещенного над обмоткой, должен отклониться

АВТОМАТИЧЕСКИЙ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫЙ КОНТРОЛЬ НАПРАВЛЕНИЯ ВЕКТОРА ПОЛЯ В СИСТЕМАХ КОМПЕНСАЦИИ МАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ КОРАБЕЛЬНЫХ КОРПУСНЫХ КОНСТРУКЦИЙ

Б. Ю. Семёнов, начальник сектора – гл. конструктор направления СКЭМП
АО «НПФ «Меридиан»,
контакт. тел. (812) 602 0375, доб. 526



Рис. 3. Модель секционированных обмоток компенсации постоянных магнитных полей

за борт; если компас помещен под обмоткой в районе борта, то северный конец стрелки должен отклониться в направлении диаметральной плоскости корабля.

В случае, если компенсационные обмотки разбиты на отдельные секции, управляемые от отдельных источников питания (рис. 3), проверка осуществляется для каждой секции отдельно.

Организация указанной проверки в период постройки корабля позволяет избежать неправильного подключения обмоток и, соответственно, исключить возможные дополнительные затраты времени на поиск причины отсутствия компенсации магнитного поля или даже увеличения его уровня. Однако в ходе эксплуатации заказов, особенно в период между проведением мероприятий по контролю магнитного поля, вероятность ошибки повышается. Эксплуатационный персонал может проводить проверку сопротивления изоляции, восстановительные работы, связанные с отключением обмоток от источников питания, и затем подключить обмотки с переполосовкой. Ухудшение поля корабля в этом случае никто не заметит до момента прохождения очередного контроля поля на стенде, а этот срок может исчисляться несколькими месяцами.

Применение системы автоматизированного контроля направления токов

(САКНТ) в компенсационных обмотках позволит обеспечить контроль правильности сборки системы компенсации магнитного поля после работ, проводимых персоналом в период эксплуатации. Конечно, установка такой системы потребует некоторых дополнительных материальных затрат и размещения дополнительного оборудования, но к достоинствам системы можно отнести возможность ее установки на любые корабли, в том числе продолжительно находящиеся в эксплуатации. Вследствие естественного старения отказы обмоток на таких заказах происходят чаще, а значит, увеличивается количество операций «сборка-разборка» в периоды между контролем поля.

В качестве основного элемента датчика системы САКНТ целесообразно использовать бесконтактные датчики тока с элементом Холла (рис. 4). Достоинства таких датчиков заключаются, во-первых, в том, что они не имеют гальванической связи с измерительной цепью, во-вторых, что у них малые габариты, и, в-третьих, что выпуск датчиков тока освоен в серийном производстве отечественной промышленностью.

Через окно датчика тока пропускаются все витки компенсационной обмотки (рис. 5) в одном направлении,



Рис. 4. Примеры датчиков тока с элементами Холла

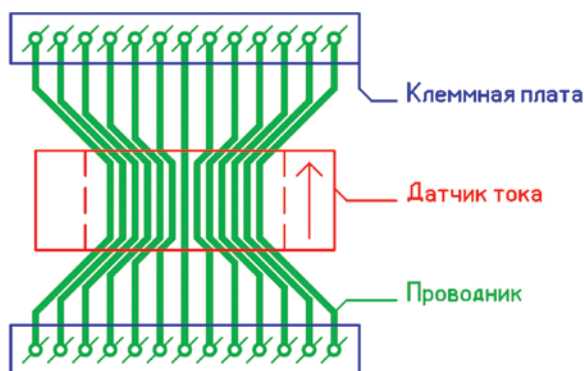


Рис. 5. Конструкция датчика направления тока обмотки

положительное направление тока указано на корпусе датчика тока стрелкой. Конструктивно датчик тока может быть включен в состав соединительной коробки с клеммными платами. Также

и по запросу со стороны внешнего устройства (контроллера шины) отправляет пакет. Интерфейс обмена данными может быть любым – RS-485, CAN, «Манчестер-2» и иные варианты.

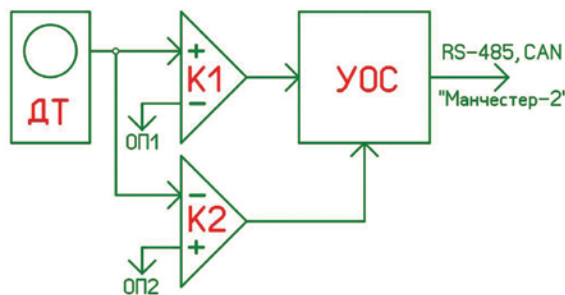


Рис. 6. Структура канала датчика тока в системе САКНТ

в состав коробки включаются схема питания и схема обработки сигнала.

Структурная схема канала датчика тока показана на рис. 6. Датчик тока (ДТ) является первичным элементом, выполняющим считывание тока компенсационной обмотки. Далее сигнал поступает на компараторы (К1 и К2), обеспечивающие формирование сигналов «ток больше нуля» и «ток меньше нуля». Опорные сигналы ОП1 и ОП2 задают уставки тока, близкие к нулевому, в целях обеспечения помехоустойчивости схемы контроля. Далее сигналы «ток больше нуля» и «ток меньше нуля» поступают на устройство обработки сигнала (УОС), которое «упаковывает» их в соответствующий цифровой пакет

На рис. 7 показана общая структура системы САКНТ. Компенсационные обмотки КО1... КО_п проходят через соответствующие коммутационные коробки КК1... КК_п с датчиками тока. Информационная магистраль проходит через все коммутационные коробки и замыкается на блок взаимодействия с датчиками тока (БВДТ), который, в свою очередь, взаимодействует с аппаратурой управления системой компенсации магнитных полей.

Алгоритмы работы САКНТ могут иметь разное построение, исходя из функционала составных частей. Один из возможных вариантов алгоритма функционирования может быть таким: при включении аппаратуры уп-

равления формируется сигнал запуска БВДТ, который последовательно задает ток положительной и отрицательной полярности для адресуемого источника питания компенсационной обмотки, а затем считывает информацию датчика тока. Если результат действия управляющего сигнала приводит к правильному результату, в аппаратуре управления (в привязке к конкретной обмотке или секции обмотки) устанавливается сигнал «готов», в противном случае устанавливается сигнал «неисправность», а БВДТ переходит к следующей обмотке. Если на все запросы получены сигналы «готов», то запуск аппаратуры управления в штатном режиме разрешается, в противном случае запуск аппаратуры управления блокируется до момента полного устранения несоответствий.

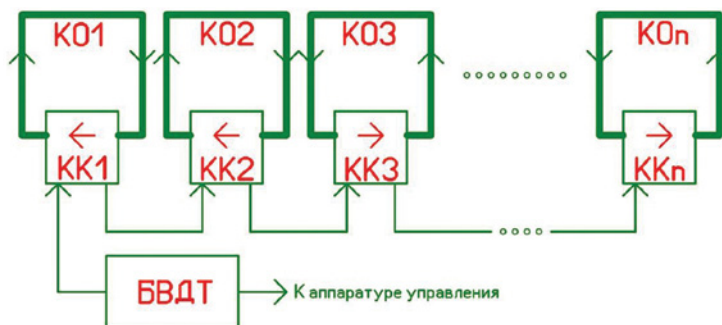


Рис. 7. Общая структура САКНТ

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Рассмотренный в статье способ контроля правильного подключения компенсационных обмоток в процессе эксплуатации систем компенсации магнитных полей корабельных корпусных конструкций представляет собой распределенную систему датчиков, которые контролируют направление тока непосредственно в обмотках (или их секциях). Применение подобной системы контроля на кораблях позволит улучшить качество технической готовности систем компенсации постоянных магнитных полей и значительно снизить влияние человеческого фактора в эксплуатации систем в периодах между очередными проверками уровня магнитного поля.■

Дейдвудные подшипники — одни из важных элементов энергетической установки судна, отвечающие за соосность и равномерное вращение всего валопровода. В целом валопровод предназначен для передачи частоты вращения и крутящего момента от главного двигателя гребному винту и восприятия осевого усилия от гребного винта к корпусу судна [3, 6]. Он состоит из гребного, промежуточного и упорного валов, которые соединены между собой и должны располагаться на одной оси. Сохранение соосности валопровода — одно из условий бесперебойной и надежной работы в процессе эксплуатации.

Основная функция дейдвудных подшипников как подшипников скольжения — обеспечение плавного вращения гребного вала, минимизации трения между облицовкой гребного вала и антифрикционным материалом самого подшипника, восприятие внешних радиальных и осевых нагрузок, а также обеспечение герметичности дейдвудного устройства судна [3, 6, 9]. Их конструкция зависит главным образом от типа дейдвудного устройства, размеров гребного вала, места расположения подшипника и типа антифрикционного материала. Для предотвращения проворачивания и продольного перемещения подшипники крепят к дейдвудной трубе при помощи болтов и фланца, изготовленного вместе с втулкой, или при помощи стопорных болтов в случае выполнения втулок без фланца.

Сами дейдвудные подшипники в зависимости от используемого антифрикционного материала делятся всего на два вида: металлические и неметаллические. Антифрикционные материалы располагаются в металлической или латунной втулке в виде цельного вкладыша или в виде отдельных планок по всему внутреннему диаметру самой втулки. Широкое применение нашли расположения планок в дейдвудном подшипнике по схеме «бочка» или «ласточкин хвост».

Правильный выбор и исполнение дейдвудных подшипников в зависимости от диаметра гребного вала и действующих нагрузок, а также на основании действующих нормативных и регламентирующих документов напрямую влияют на надежность, экономичность и долговечность работы всего дейдвудного устройства и всей энергетической установки судна в целом [8, 11].

Износ дейдвудных подшипников гребных валов — одна из основных причин их ускоренного выхода из строя и нарушения соосности судового валопровода. Главными факторами, способствующими износу, выступают абразивные частицы (песок, ил и пр.), попадающие в зону контакта вала и подшипника, виб-

РАЗРАБОТКА СПЕЦИАЛЬНОЙ ОПРАВКИ ДЛЯ РЕМОНТА ДЕЙДВУДНЫХ ПОДШИПНИКОВ

В.В. Куц, д-р техн. наук, проф.,

ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет»,

А.А. Халыкин, канд. техн. наук, доцент, Каспийский институт морского и речного транспорта им. ген.-адм. Ф. М. Апраксина,

А.И. Машенко, канд. техн. наук, доцент,

С.А. Шугаев, аспирант,

Д.Р. Зубков, аспирант, ФГБОУ ВО АГТУ,

контакт. тел. +7 (917) 084 6082, +7 (978) 558 0575, kuc-vadim@yandex.ru



Рис. 1. Капролоновая втулка (ОСТ 5.4183–76)



Рис. 2. Общий вид пазов «ласточкин хвост» (ОСТ 5.5154–74)

рация, ударные нагрузки, а также неравномерная загруженность всего подшипника по его длине. Повышенное трение приводит к перегреву, деформации и, в конечном итоге, к разрушению. Признаками износа могут служить увеличение зазора между гребным валом и дейдвудным подшипником, появление шума и вибрации при работе.

Ремонт дейдвудных подшипников включает в себя ряд технологических операций, направленных на восстановление их работоспособности с использованием ряд станочного оборудования. В зависимости от характера и степени повреждений ремонтные работы могут включать в себя шлифовку или расточку подшипника до ремонтного размера, восстановление посадочных мест, а также замену или ремонт смазочных каналов (пазов). В случаях значительного износа или повреждения может потребоваться полная замена дейдвудного подшипника. Важные части ремонтного процесса — тщательная очистка всех поверхностей, правильный подбор смазочных материалов и соблюдение точных допусков при монтаже.

Техническое обслуживание, регулярный осмотр и своевременный ремонт являются ключевыми способами продления срока службы дейдвудных подшипников. Использование высококачественных смазочных материалов, контроль за состоянием уплотнений и своевременное устранение любых признаков износа или повреждений позволяют минимизировать риски внезапных отказов дейдвудного устройства и всей энергетической установки судна [10, 13]. Современные методы диагностики

и контроля могут существенно повысить эффективность технического обслуживания и в дальнейшем облегчить проведение качественных ремонтно-восстановительных работ.

Одна из задач при изготовлении или ремонте металлических (например Ст. 20, ГОСТ 1050–2013), латунных (например ЛС 59-1, ГОСТ 15527–2004) или полимерных (например, ОСТ 5.4183–76) втулок — это фрезерование или долбление (строгание) смазочных каналов (рис. 1) или пазов «ласточкин хвост» (рис. 2) для неподвижного расположения антифрикционного материала в виде вкладышей.

Продольные каналы капролоновой (полиамидной) втулки (ГОСТ 24888–81), которые представлены на рис. 1, предназначены для эффективного распределения смазочного материала в виде забортной воды по всей длине подшипника и удаление абразива (песок, ил и пр.) или частиц износа в районе контакта гребного вала с дейдвудным подшипником. Равномерное распределение смазки и удаление продуктов износа напрямую влияют на снижение трения и, как следствие, нагрева всего подшипника. Высокая температура может привести к деформации материалов, потере свойств смазки и даже к заклиниванию гребного вала. Качество и точность изготовления продольных каналов на прямую влияет на срок службы дейдвудных подшипников. Это касается и пазов «ласточкин хвост» (см. рис. 2), где устанавливаются вкладыши антифрикционного материала высотой не более 30 мм и шириной не более 90 мм. Точность изготовления пазов является

важным требованием, так как от нее напрямую зависит качество соединения, его прочность, герметичность и способность выдерживать действие статических и динамических нагрузки.

Строгальная обработка – один из способов механической обработки внутренних пазов резанием, при котором послойно снимается лишний материал с целью получения плоских, прямолинейных или фасонных поверхностей. В основе данного процесса лежит возвратно-поступательное движение режущего инструмента (например, резца) по поверхности заготовки. При этом строгание отличается от других методов обработки тем, что инструмент выполняет резание только в одном направлении – при рабочем ходе. Возвратный ход, в отличие от фрезерования или токарной обработки, не участвует в съеме материала. Для проведения строгальной обработки внутри цилиндрической втулки используют специальное приспособление, которая повышает безопасность, качество и точность обработки.

Для изготовления продольных пазов часто используют также фрезерные станки с делительными головками или специализированные нарезатели пазов.

В целом достижение высокой точности изготовления продольных пазов дейдвудных подшипников требует комплексного подхода. Он включает выбор правильных режущих инструментов и технологий, соблюдение режимов и параметров обработки, использование качественной оснастки и точный контроль качества.

Таким образом, актуальной является задача создания компактного, переналаживаемого приспособления, позволяющего фрезеровать продольные пазы непосредственно на токарно-винторезном станке с использованием штатного суппорта и патрона. Цель настоящей работы – разработка конструкции специальной оправки с регулируемым по частоте электрошпинделем и оценка ее технологических возможностей при обработке дейдвудных втулок из различных материалов.

ТЕХНОЛОГИЯ ФРЕЗЕРОВАНИЯ ПАЗОВ ДЕЙДВУДНЫХ ПОДШИПНИКОВ

В данной работе предлагается технология фрезерования (нарезания) пазов внутри втулки дейдвудного подшипника на токарно-винторезном станке с использованием специально разработанной оправки с регулирующей частотой вращения режущего инструмента (рис. 3).

В патроне 1 токарно-винторезного станка располагается сама втулка подшипника 2. Механическая обработка должна выполняться в патроне станка,

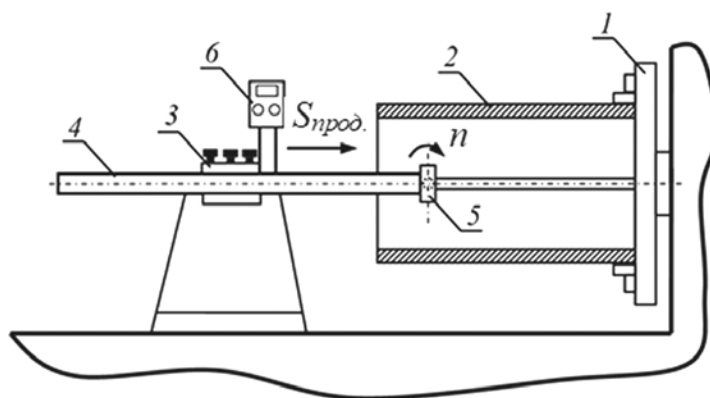


Рис. 3. Общий вид обработки на токарно-винторезном станке [12]

исключающего возможность деформации втулок от усилий крепления. Это сказывается в дальнейшем на надежности расположения в дейдвудном устройстве судна. В данном случае втулка не вращается в процессе обработки, а устанавливается в нужном положении по одной оси с режущим элементом электрошпинделя 5 оправки, так как получаемые пазы располагаются с шагом по диаметру внутри самой втулки [12]. В резцедержатель 3 устанавливается станнина 4 оправки с использованием специального держателя, который представлен на рис. 2. Сам держатель изготовлен из листового проката (конструкционной стали и толщиной 10 мм), трех втулок с внутренней метрической резьбой и трех прижимных болтов М12. Все детали соединены между собой путем аргодуговой сварки плавящимся электродом в соответствии с требованиями ГОСТ 14771–76. В качестве присадочной проволоки была использована Св-08Г2С (ГОСТ 2246–70). Выбранный способ сварки позволяет получить прочное и качественное неразъемное соединение, а также снизить риск деформации свариваемых между собой деталей (особенно толщиной стенки не более 3 мм).

Крупногабаритные втулки дейдвудных подшипников (внутренний диаметр – до 1000 мм, толщина стенки – 20–40 мм) чувствительны к радиальным усилиям зажима. Для исключения пластических деформаций и сохранения круглости применяют следующие технологические приемы:

- *сменные неподвижные кулачки с увеличенной поверхностью контакта.* Вместо стандартных кулачков устанавливают специально изготовленные прямые или обратные кулачки с шириной губок 60–80 мм, чтократно увеличивает площадь соприкосновения. Рабочую поверхность кулачков протачивают «по месту» под фактический наружный диаметр втулки, обеспечивая охват по дуге не менее 120° на каждом кулачке;
- *прокладки из мягкого материала.* Между кулачками и наружной по-

верхностью втулки помещают прокладки из отожжённой меди, алюминия или капрлона толщиной 3–5 мм. Прокладки равномерно распределяют нагрузку и предотвращают появление вмятин. Их также протачивают по радиусу закрепляемой детали;

- *тарированная затяжка.* Для каждого типоразмера втулки экспериментально или расчетным путем определяют безопасный крутящий момент на ключе патрона. Затяжку выполняют динамометрическим ключом, контролируя момент отдельно на каждом кулачке. Это исключает чрезмерное сжатие, но сохраняет неподвижность при фрезеровании;
- *внутреннее разжимное приспособление* (при необходимости). Если из-за малой жесткости стенки возможно ее смятие, внутрь втулки перед обработкой устанавливают легкое разжимное кольцо или трехлапый сегментный домкрат с мягкими вставками. Оно создает умеренное встречное усилие изнутри, компенсируя радиальное воздействие кулачков, и легко извлекается после завершения обработки всех пазов;
- *дополнительная осевая фиксация.* Для предотвращения смещения втулки вдоль оси (особенно при ослаблении кулачков в момент поворота) используют упор в торец фланца – разрезное кольцо, закрепленное на корпусе патрона, или поджим вращающимся центром задней бабки (если конструкция втулки это допускает). Тем самым отпадает необходимость в излишней затяжке кулачков для удержания от осевого сдвига.

Применение указанных мер позволяет надежно зафиксировать тонкостенную крупногабаритную втулку в патроне, исключив деформации и нарушения геометрии, что полностью соответствует требованию «выполнять обработку в патроне станка, исключая возможность деформации втулок от усилий крепления», заявленному в технологии.

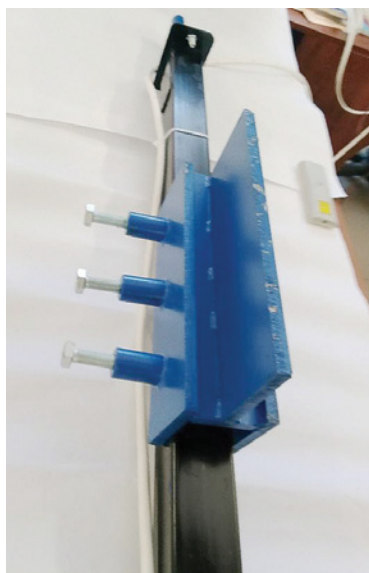


Рис. 4. Специальный держатель оправки

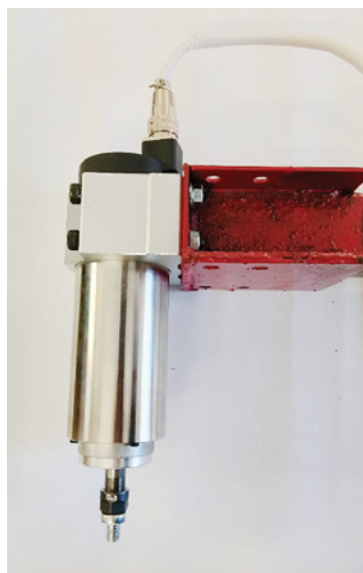


Рис. 5. Расположение электрошпинделя на конце оправки

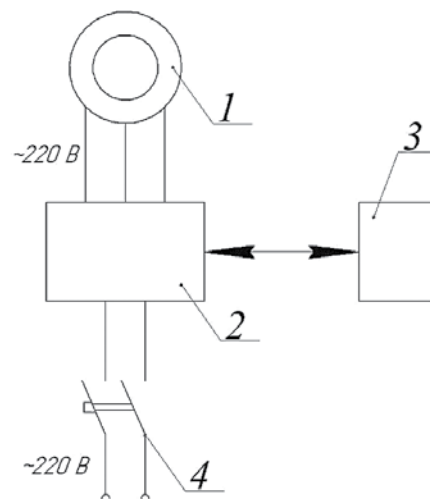


Рис. 6. Принципиальная схема электрической сети оправки
1 – электрошпиндель; 2 – преобразователь частоты; 3 – пульт управления; 4 – автоматический выключатель

Металлическая станина оправки располагается в специальном держателе и зажимается тремя болтами, как это показано на рис. 4. Трехточечный зажим держателя распределяет нагрузку более равномерно, что снижает риск смещения всей оправки под действием сил резания, вибраций и других возникающих нагрузок. Это особенно важно при тяжелых режимах обработки или обработке хрупких материалов. В свою очередь специальный держатель устанавливается в резцедержателе токарно-винторезного станка и крепится прижимными болтами.

На первоначальном этапе станина была изготовлена из металлической профильной трубы размерами 50×50×2 мм согласно действующему стандарту ГОСТ 32931–2015. Длина станины составляет 1,5 м. На одном конце крепится ручка диаметром 30 мм и длиной 150 мм. На другом – через специальный хомут устанавливается сам электрошпиндель 5, в котором совмещены вал, электрический двигатель и цанговый патрон для зажима режущего инструмента. Он может располагаться относительно станины под углом 90 градусов или параллельно оси самой станины, что делает саму оправку более универсальной при проведении механических работ. Используемый хомут обеспечивает надежную фиксацию электрошпинделя на оправке и выполняет ряд важных функций (рис. 5): сохранение соосности режущего инструмента; снижение вибраций; защита от смещений; простота установки и разборки; регулировка высоты. Такая функция, как регулировка высоты, позволяет настраивать высоту крепления электрошпинделя, что удобно при подаче по оси втулки или при необходимости быстрой перенастройки. Хомут изготовлен из сплава алюминия, что повышает устойчивость к коррозии.

Установка оправки в резцедержатель позволяет задать движение со скоростью v по всей длине обрабатываемой втулки 2. Охлаждение электрошпинделя принудительное воздушное. Электрошпиндель подключается к преобразователю частот 6, посредством которого двигатель раскручивается до необходимой частоты ω (рис. 6) и, соответственно, нужных оборотов вала. В цанговый патрон электрошпинделя может устанавливаться как фасонная фреза, так и стандартные. В качестве режущих инструментов для фрезерования таких пазов служат одноугловые дисковые или концевые фрезы с углом профиля между режущими кромками, равным углу профиля паза α .

Основные характеристики используемого электрошпинделя и преобразователя частоты представлены в таблице.

Станина, имея достаточные жесткость и длину, позволяет делать пазы путем реза внутри втулки подшипника диаметром d свыше 250 мм и длиной L свыше 1000 мм. Предлагаемый механический способ обработки может быть свободно использован для нарезания фрезой внутренних пазов высотой t и шириной B , расположенных по диаметру втулок самих дейдвудных подшипников.

Следует отметить, что в процессе фрезерования пазов втулка подшипника 2 (см. рис. 3) должна быть надежно закреплена в патроне самого станка. Закрепление должно быть достаточно прочным и жестким, чтобы противостоять тем механическим силам резания, которые возникают при обработке самой втулки фрезой (см. рис. 6).

На основании общей длины электрошпинделя и установленной в цанговый патрон фрезы, а также в соответствии с требованиями стандартов ОСТ 5.4183–76 и ОСТ 5.5154–74 данная изготовленная оправка может использоваться для цилиндрических втулок дейдвудных подшипников с внутренним диаметром в диапазоне от 300 до 700 мм.

ПАРАМЕТРЫ РЕЖИМА ФРЕЗЕРОВАНИЯ ДЕЙДВУДНЫХ ПОДШИПНИКОВ

Фрезерование – распространенный способ обработки разных материалов. Для обеспечения высокого качества и точности обработки с использованием оправки и экономии времени важно правильно подобрать режим резания. Режимы зависят от нескольких ключевых параметров [1, 2, 4]: скорости вращения шпинделя, скорости подачи и резания,

Таблица

Основные характеристики электрошпинделя и преобразователя частоты

Электрошпиндель		Преобразователь частоты	
Параметр	Численное значение	Параметр	Численное значение
Геометрические размеры, мм	Ø60×180	Геометрические размеры, мм	150×120×78
Мощность, кВт	0,8	Мощность, кВт	1,5
Частота вращения, об/мин	24 000	Выходной ток, А	7
Напряжение, В	220	Напряжение, В	220
Общая масса, кг	4,36	Общая масса, кг	0,8
Частота вращения, Гц	400	Частота тока, Гц	50

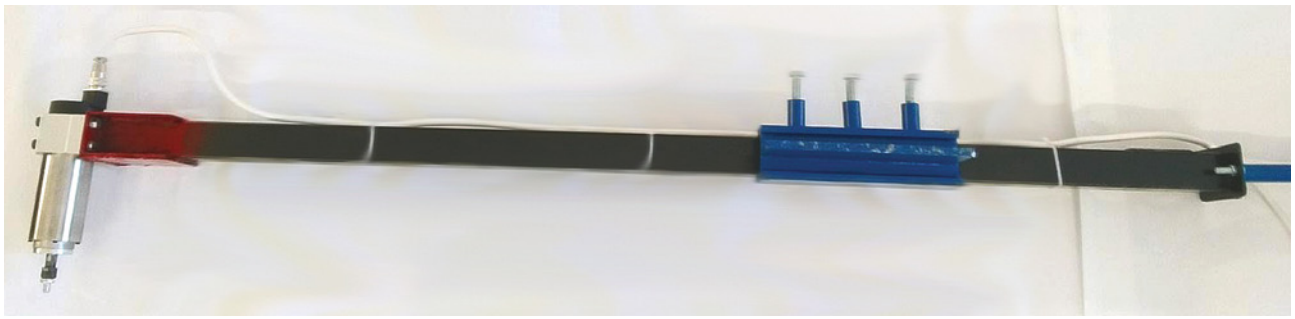


Рис. 7. Общий вид оправки

глубины фрезерования и других характеристик, которые зависят напрямую от обрабатываемого материала и геометрических размеров и форм самой детали или заготовки. Безусловно, принятые численные значения режимом обработки влияют также на срок службы оборудования и инструмента. Общий вид механической оправки представлен на рис. 7.

Скорость вращения фрезы, м/с,

$$V = \frac{\pi d n}{60000}, \quad (1)$$

где d – диаметр фрезы, мм; n – частота вращения фрезы, мин⁻¹.

Скорость подачи, м/мин,

$$S_{\text{прод}} = \frac{S_z z n}{1000}, \quad (2)$$

где S_z – подача на зуб фрезы, мм; z – число зубьев, шт.

Сила резания можно определить по следующему выражению:

$$P = \frac{9,81 \cdot C \cdot t \cdot B \cdot z \cdot S_z}{D}, \quad (3)$$

где C – коэффициент (при фрезеровании стали $C = 68$, чугуна – $C = 30$; бронзы – $C = 18$); t – глубина фрезерования, мм; B – ширина фрезерования, мм; z – число зубьев фрезы; S_z – подача на один зуб фрезы, мм/зуб ($S_z = 0,05$ мм/зуб); D – диаметр фрезы, мм.

Частоту вращения фрезы n (мин⁻¹) (см. рис. 3) определяем на основании заданного значения преобразователем частоты ω (Гц):

$$n = 60 \cdot \omega. \quad (4)$$

Глубина фрезерования зависит от параметров жесткости станка, длины режущей части инструмента и свойства обрабатываемого материала [1–3]. При эксперименте фрезерование начинают с небольшой глубины и постепенно увеличивают ее до тех пор, пока не появятся вибрации или ухудшение качества обработки.

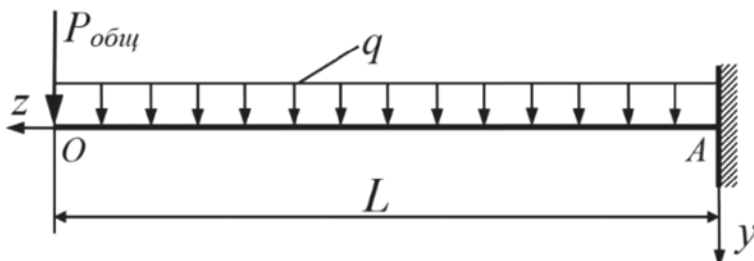


Рис. 8. Расчетная схема оправки

В качестве оценки жесткости при фрезеровании пазов внутри стальной втулки рассмотрим расчетную схему оправки в виде консольной балки рабочей длиной L , нагруженной распределенной массой и сосредоточенной нагрузкой (рис. 8). Распределенная нагрузка моделирует вес станины ($q \approx 30$ Н/м), сосредоточенная нагрузка $P_{\text{общ}}$ – суммарная сила от веса P_1 шпинделя и силы P_2 (3), возникающей при фрезеровании втулок подшипников (3).

Статический прогиб балки в точке O описывается выражением

$$y_{\text{ст}} = \frac{F_{\text{общ}} L^3}{3EJ} + \frac{qL^4}{8EJ}, \quad (5)$$

где L – рабочая длина оправки; EJ – изгибная жесткость станины (E – модуль упругости, для стали – $2,1 \cdot 10^{11}$ Па; J – момент инерции, м⁴).

Поперечное сечение станины (полый тонкостенный квадрат) шириной стенки $B = 50$ мм и толщиной $s = 2$ мм представлено на рис. 9.

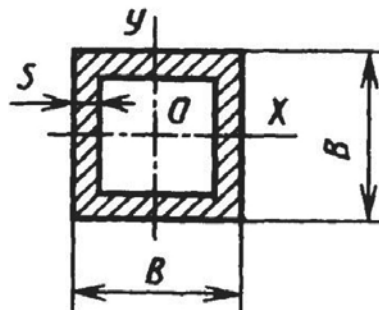


Рис. 9. Расчетная схема оправки

На основании принятых размеров сечения станины выполняется условие между параметрами, мм:

$$s < \frac{B}{15}, \quad (6)$$

тогда момент инерции сечения станины (рис. 9) определяем по следующему выражению, м⁴:

$$J = \frac{2}{3} s B^3. \quad (7)$$

Изгибная жесткость станины оправки на основании (7) будет иметь численное значение:

$$EJ = 2,1 \cdot 10^{11} \cdot \frac{2}{3} \cdot 2 \cdot 10^{-3} \cdot 50^3 \cdot 10^{-9} = 3,5 \cdot 10^4, \text{ Н} \cdot \text{м}$$

Значение собственной частоты поперечных колебаний оправки (см. рис. 8) определяем как

$$P_{\text{оп}} = \sqrt{\frac{g}{\delta_{\text{ст}}}} = \sqrt{\frac{24EJg}{L^3(8F_{\text{общ}} + 3qL)}}, \quad (8)$$

где g – ускорение свободного падения ($\approx 9,81$ м/с²).

В качестве примера принимаем параметры фрезы концевые с цилиндрическим хвостовиком согласно ГОСТ 17025–71 [1,2,7]: $D = 6$ мм; $z = 4$. Ширину фрезерования канавок подшипников принимаем равной диаметру фрезы ($B = D$). Выражение силы резания (3) относительно глубины t будет иметь вид

$$P = P_2 = 9,81 \cdot C \cdot t \cdot z \cdot S_z = 9,81 \cdot 68 \cdot 4 \cdot 0,05 = (133,4 \cdot t), \text{ Н}. \quad (9)$$

Глубина фрезерования пазов для металлической втулки лежит в диапазоне от 0,5 до 3 мм [1, 2]. Рабочая длина (рис. 8) с учетом ширины специального держателя $L = 1,3$ м. На основании общей массы электрошпинделя (см. табл. 1) на рис. 10 представлен график изменения собственной частоты (8) поперечных колебаний относительно нагрузки $P_{\text{общ}}$ и рабочей длины L оправки в диапазоне от 1,1 до 1,3.

Как видно из полученного графика (рис. 10), данная оправка обладает достаточной жесткостью и виброустойчивостью. В случае возникновения повышенной вибрации или снижения качества самого резания рекомендуется уменьшить глубину t (3) и снизить скорость подачи (2). При обработке пазов дейдвудных подшипников более 1 м на основании полученного выражения (8) можно поменять сечение станины, увеличив толщину и (или) ширину профильной трубы.

Для получения пазов с равным шагом по окружности предлагается использовать съемный делительный диск, который закрепляется на заднем фланце шпинделя (если он доступен) или на

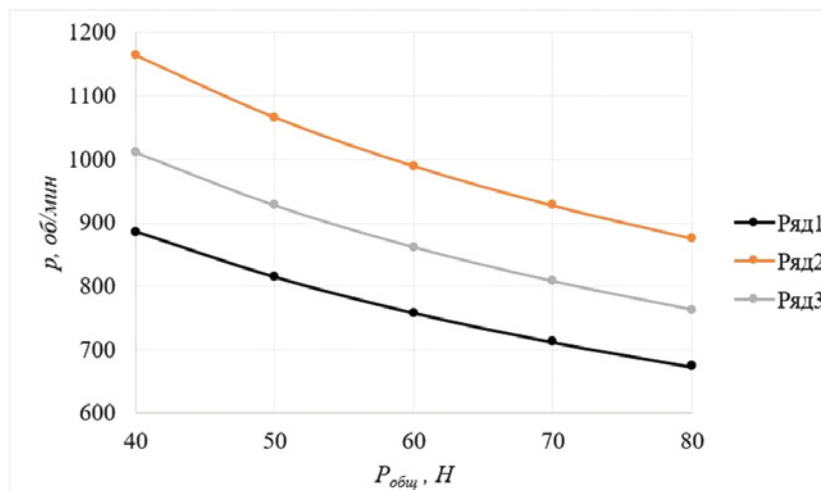


Рис. 10. График $p = f(P_{общ})$
Ряд 1 – $L = 1,3$ м; ряд 2 – $L = 1,2$ м; ряд 3 – $L = 1,1$ м

наружной цилиндрической поверхности корпуса патрона. Диск представляет собой стальное кольцо толщиной 8–10 мм, на котором с высокой точностью (допуск углового положения $\pm 10'$) предварительно просверлены отверстия, количество и угловые координаты которых соответствуют числу пазов, заданному чертежом. Разметку и сверление отверстий выполняют на координатно-расточном станке либо с помощью универсальной делительной головки.

На неподвижной части передней бабки или на специальном кронштейне, закрепленном на станине станка, монтируют подпружиненный цилиндрический фиксатор с конусным или шариковым наконечником, ответно входящим в отверстия делительного диска. Фиксатор снабжен рукояткой для быстрого вывода из зацепления.

Процесс смены позиции после обработки одного паза выглядит следующим образом:

1. Вывод фиксатора из отверстия делительного диска.
2. Частичное ослабление зажима кулачков патрона настолько, чтобы втулка могла свободно проворачиваться, но при этом не теряла центровки (усилие ослабления минимально необходимое; при больших массах допустимо оставить легкое трение для предотвращения самопроизвольного проворота).
3. Вручную, с помощью рычага или через зубчатую передачу (если патрон имеет такую возможность) поворот патрона вместе с втулкой до момента, когда фиксатор под действием пружины заскочит в очередное отверстие диска.
4. Затягивание кулачков патрона с требуемым усилием, обеспечивающим надежное закрепление и исключающим деформацию.
5. Проверка отсутствия смещения по визуальным рискам или с помощью индикатора, после чего фиксация фиксатора стопорным винтом (если он несамотормозящийся).

сатора стопорным винтом (если он несамотормозящийся).

Для предотвращения осевого сдвига втулки при ослабленных кулачках рекомендуется использовать передний упор – разрезное кольцо, устанавливаемое на корпус патрона и упирающееся в торец втулки, либо вращающийся центр задней бабки (если конструкция втулки допускает поджатие по оси). Применение упора гарантирует, что при повороте втулка не сместится вдоль оси, и после зажима ее положение останется неизменным.

Точность углового положения можно дополнительно проконтролировать с помощью оптического квадранта, базированного на обработанный торец фланца втулки, или лазерного угломера. Для удобства повторяемости на делительном диске и на корпусе патрона наносят порядковые номера позиций.

Данное делительное устройство не требует модернизации станка, изготавливается силами ремонтного предприятия и позволяет получать пазы с угловым расположением в пределах допусков, установленных ОСТ 5.4183–76 и ОСТ 5.5154–74, при этом втулка остается зажатай в штатном патроне станка, а деформации открепления исключаются благодаря правильному выбору момента затяжки и возможной установки мягких накладок на кулачки.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предлагаемая технология решает задачу качественного изготовления пазов во втулках дейдвудных подшипниках как при их производстве, так и при ремонте, в строгом соответствии с нормативной и регламентирующей документацией. Важным преимуществом является возможность использования имеющегося на заводе станочного парка, что избавляет от необходимости приобретения дорогостоящего оборудования. Разработанная оправка позволяет формировать пазы типа «ласточкин

хвост» по всей длине корпуса, применяя стандартные и фасонные резцы для установки вкладышей из разнообразных антифрикционных материалов. Технология также позволяет проводить процесс фрезерования втулок подшипника из разных материалов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Даниленко Б.Д., Зубков Н.Н. Выбор режимов резания (продольное точение, сверление спиральными сверлами, фрезерование концевыми фрезами): учеб. пособие / Под ред. В.С. Булошников. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2005. – 252 с.
2. Диревук Е.П. Фрезерные работы: пособие к лабораторным работам для студентов специальности 1-08 01 01-01 «Профессиональное обучение (по направлениям)», направления специальности 1-08 01 01-01 «Профессиональное обучение (машиностроение)» – Минск: Изд. БНТУ, 2018. – 105 с.
3. Технология производства судовых энергетических установок: Учебник / Дорошенко П.А., Рохлин А.Г., Булатов В.П. и др. – Л.: Судостроение, 1988. – 440 с.
4. Ивахненко А.Г., Куц В.В. Структурно-параметрический синтез технологических систем: монография. – Курск. гос. техн. ун-т. 2010. – 153 с.
5. Ковалев Н. А. Справочник сварщика. – Изд. 2-е. – Ростов-на-Дону: Феникс, 2012. – 350 с.
6. Комаров В.В. Состояние укладки гребных валов на дейдвудных опорах // Вестник АГТУ. – Сер.: Морская техника и технология. – 2006. – №2 (31) – С. 259–267.
7. Маталин А. А. Технология машиностроения: учеб. – 3-е изд., стереотип. – СПб.: Лань, 2010. – 512 с.
8. Михайлова М.А. Анализ изнашивания дейдвудных подшипников в зависимости физико-механических характеристик материала вкладышей и условий эксплуатации судна // Вестник АГТУ, 2005. – №2 (25). – С. 135–140.
9. Румб В.К. Прочность судового оборудования. Конструирование и расчеты прочности судовых валопроводов: учебник. – СПб.: Изд. СПбГМТУ, 2008. – 298 с.
10. Исследование поперечных колебаний судовых валопроводов / Халевкин А.А., Мамонтов В.А., Лошадкин Д.В., Макеев С.А., Шацков Д.О., Саламех А. // Монография. – Каспийский ин-т морского и речного транспорта имени ген.-адм. Ф.М. Апраксина – филиал ФГБОУ ВО «ВГУВТ». – 2020. – 73 с.
11. Халевкин А.А., Матвеев Ю.И., Саламех Али, Слиман Саусан. Повышение надежности механизмов судовой энергетической установки // Судостроение. – 2024. – № 5. – С. 62–65.
12. Халевкин А.А., Бондаренко В.В., Куц В.В. Матвеев Ю.И. Технология ремонта дейдвудных подшипников валопроводов судов // Морской вестник. – 2025. – № 2 (94). – С. 59–62.
13. Чура М.Н., Файвисович А.В. Эксплуатационные повреждения гребных валов // Транспортное дело России. – 2011. – №11. – С. 110–112. ■

Выбор типа корабельной энергетической установки (КЭУ) относится к числу принципиальных вопросов проектирования корабля [1]. В числе задач, которые решаются при исследовательском проектировании корабля [2], есть задача оценки влияния пропульсивного комплекса на его облик. Наличие инструмента, позволяющего на этапе исследовательского проектирования оценить влияние типа главных двигателей (ГД) и схемы КЭУ на целевую эффективность корабля, повышает объективность ответа на вопрос о векторе развития энергетических установок [3]. В данной работе описан метод оценки влияния типа ГД и схемы КЭУ на целевую эффективность корабля, облик которого определяется на уровне нулевого приближения: главные размерения и нагрузка масс.

Для реализации предлагаемого метода разработаны математическая модель и расчетный алгоритм, краткое описание которых приведены ниже. Дана оценка влияния схемы КЭУ: типа ГД, способа передачи мощности к движителям, количества ГД, работающих на один вал, массы акустической защиты. В данном случае решена обратная задача, где есть набор ГД конкретных типов и мощности, задана схема КЭУ (комбинированная или всережимная). Определяется нормальное водоизмещение корабля $D_{\text{норм}}$ по методу, предложенному в работе [4] для заданной скорости полного переднего хода $V_{\text{пх}}$ и далее сохраняется постоянным. Задана дальность плавания на оперативно-экономическом ходу (ОЭХ) $R_{\text{оэх}}$ при нормальном запасе топлива (расчетная величина). В качестве критерия оценки эффективности использована масса полезной нагрузки корабля $m_{\text{пн}}$, которая определяется по остаточному принципу.

Для оценки чувствительности предлагаемого метода к варьируемым факторам был выполнен иллюстративный пример, приведенный ниже. Исходным пунктом послужила работа [3], в которой предлагается для корабля океанской зоны водоизмещением до 10 000 т в качестве форсажных двигателей комбинированной КЭУ типа CODAD (англ. Combined Diesel and Diesel) использовать среднеоборотные дизели (СОД) мощностью 25 МВт. Схема такой КЭУ показана на рис. 1. Мощность главных двигателей $N_{\text{пх}}$ на $V_{\text{пх}}$, которая согласно [3], равна 30 уз, составила 60 МВт [3]. Для оценки $D_{\text{норм}}$, которое позволяет развить требуемую скорость $V_{\text{пх}}$ при заданной мощности $N_{\text{пх}}$ использован метод из [4], где получена зависимость $N_{\text{пх}}$, МВт, от комплексного параметра x ($R^2 = 0,9274$):

$$N_{\text{пх}} = 0,3938 \cdot x + 2,0508. \quad (1)$$

Сам параметр вычисляется по формуле

$$x = \frac{V_{\text{пх}} \cdot D_v}{L_{\text{квл}} 10^4}, \quad (2)$$



Рис. 1. Схематическое изображение агрегата КЭУ типа CODAD [3]

МЕТОД ВЫБОРА СХЕМЫ КОРАБЕЛЬНОЙ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ УСТАНОВКИ НА НАЧАЛЬНОМ ЭТАПЕ ПРОЕКТИРОВАНИЯ

М.Н. Буров, канд. техн. наук,

гл. конструктор по перспективным разработкам,

В.А. Пономарев, канд. техн. наук, доцент кафедры «Авиационные двигатели»

РГАТУ им. П.А. Соловьева, вед. инженер-конструктор,

ПАО «ОДК-Сатурн»,

контакт. тел. +7 (495) 232 5502, maxim.burov@uec-saturn.ru, prep56@mail.ru

где D_v – объемное водоизмещение, м^3 , $L_{\text{квл}}$ – длина по конструктивной ватерлинии.

Для получения в первом приближении $L_{\text{квл}}$ были использованы статистические зависимости отношений $L_{\text{квл}}/B_{\text{квл}}$ и $B_{\text{квл}}/T_{\text{квл}}$ от $D_{\text{норм}}$, где $B_{\text{квл}}$ – ширина по конструктивной ватерлинии, а $T_{\text{квл}}$ – осадка по конструктивную ватерлинию.

Определение коэффициента общей полноты δ , который представляет собой отношение $D_v/(L_{\text{квл}} \cdot B_{\text{квл}} \cdot T_{\text{квл}})$ выполнено по статистической зависимости, полученной по данным для кораблей близких водоизмещения и скорости хода (рис. 2).

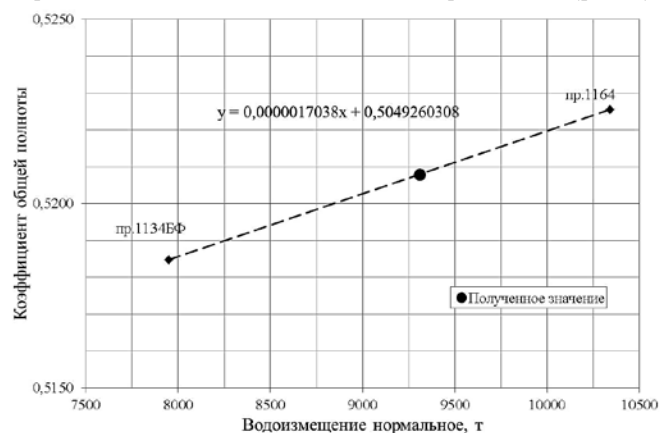


Рис. 2. Принятая зависимость коэффициента общей полноты δ от нормального водоизмещения $D_{\text{норм}}$

При использовании зависимостей (1), (2) и показанной на рис. 2 получены для $N_{\text{пх}} = 60$ МВт; $\delta = 0,521$; $L_{\text{квл}} = 166,65$ м; $B_{\text{квл}} = 18,243$ м; $D_{\text{норм}} = 9309,8$ т. В дальнейших расчетах использовано значение $D_{\text{норм}} = 9310$ т.

Проверка согласованности принятого значения δ с требуемой ходкостью выполнена по статистической зависимости, полученной Б. А. Царевым, и которая имеет вид [2]

$$\delta = 0,5 + 0,5 \exp[(-80 \pm 35) \cdot \text{Fr}^3], \quad (3)$$

где Fr – число Фруда, вычисление которого выполняется по выражению $\text{Fr} = V / \sqrt{gL_{\text{квл}}}$, V – в м/с.

На рис. 3 показаны средние и граничные значения δ , найденные по выражению (3), статистические данные кораблей и полученное значение δ . Видно, что оно находится в допустимой области и вполне согласуется с фактическими данными. Для найденного значения $L_{\text{квл}}$ и заданной величины $V_{\text{пх}}$ получим $Fr = 0,3817$.



Рис. 3. Проверка обоснованности полученного значения коэффициента общей полноты δ

Поскольку многие используемые выражения и зависимости построены для мощностей, размерность которых принята в лошадиных силах, найдем значение $N_{\text{пх}}$ в такой размерности: $N_{\text{пх}} = 60 \cdot 1000 / 0,7355 = 81557$ л. с.

Приняв значения КПД редукторной передачи $\eta_{\text{рп}} = 0,97$ и КПД валопровода $\eta_{\text{вал}} = 0,98$, найдем мощность при ППХ на валах по формуле

$$N_{\text{впх}} = N_{\text{пх}} \eta_{\text{рп}} \eta_{\text{вал}} = 81557 \cdot 0,98 \cdot 0,97 = 77547 \text{ л. с.} \quad (4)$$

Далее следует определить значение адмиралтейского коэффициента C_w для ППХ. Расчет ведется по выражению

$$C_{w_{\text{пх}}} = \frac{D_{\text{нор}}^{2/3} \cdot V_{\text{пх}}^3}{N_{\text{впх}}} = 154,1. \quad (5)$$

Из показанных на рис. 4 данных видно, что полученное значение C_w согласуется с имеющимся массивом статистических данных.

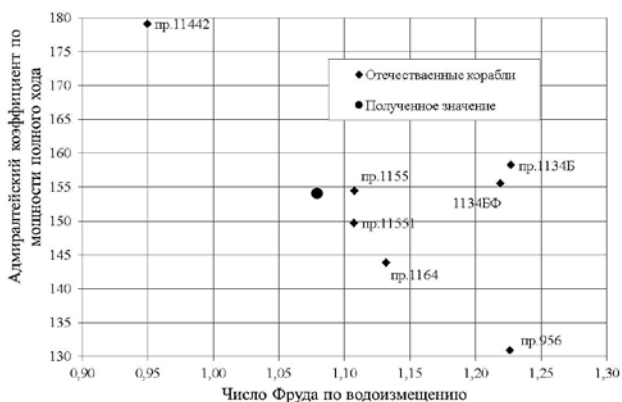


Рис. 4. Проверка обоснованности полученного значения адмиралтейского коэффициента C_w

Судя по полученным результатам проверки (рис. 3 и рис. 4), найденные значения δ и C_w корректны.

В работе [5] приводится зависимость адмиралтейского коэффициента C_w от Fr . Результаты ее пересчета для полученного значения $C_{w_{\text{пх}}}$ при $Fr = 0,3817$ для диапазона относительных скоростей от $Fr = 0,2$ до $Fr = 0,445$ приведены на рис. 5. По принятой зависимости найдено значение адмиралтейского коэффициента для ОЭХ – $C_{w_{\text{оэх}}} = 214,64$.

Расчет составляющих нагрузки выполняется с помощью трехчленного уравнения масс [1], которое имеет вид

$$AD_m + BD_m^{2/3} + C = D_m, \quad (6)$$

где AD_m , $BD_m^{2/3}$ – суммы масс, пропорциональных водоизмещению D_m в первой степени и в степени $2/3$; C – сумма масс, не зависящих от водоизмещения.

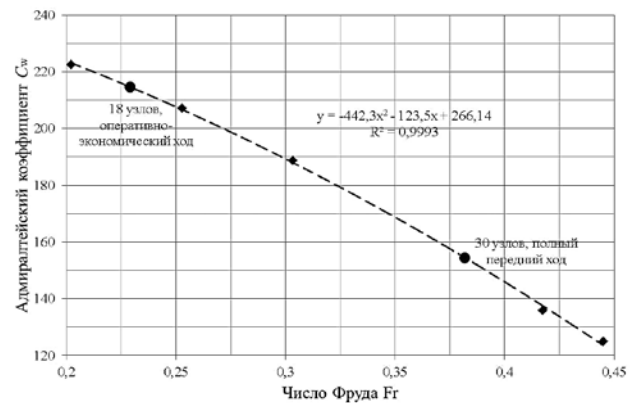


Рис. 5. Принятая зависимость адмиралтейского коэффициента C_w от Fr для корабля нормальным водоизмещением 9310 т

В нашем случае удобно использовать трехчленное уравнение масс [1] совместно с уравнением плавучести $D_m = \rho \sigma L_{\text{квл}} B_{\text{квл}} T$, которое тогда примет вид

$$\left(\frac{q_k H}{\rho \delta T} + p_k \right) D_m + \left(q_{\text{эу}} \frac{9^3_{\text{max}}}{C_{w_{\text{пх}}}} + q_t \frac{9^2_{\text{эк}}}{C_{w_{\text{оэх}}}} R \right) D_m^{2/3} + m_{\Sigma} = D_m, \quad (7)$$

где q_k – кубический модуль ($m_k = q_k L_{\text{квл}} B_{\text{квл}} H$); m_k – масса корпуса; $L_{\text{квл}}$ – длина по конструктивной ватерлинии; $B_{\text{квл}}$ – ширина по конструктивной ватерлинии; ρ – плотность морской воды, 1025 кг/м³; H – высота борта от основной линии до верхней палубы на миделе; T – осадка по конструктивную ватерлинию; p_k – относительная масса статей нагрузки, пропорциональных водоизмещению в первой степени; $q_{\text{эу}}$ – удельная масса КЭУ, подсчитанная по мощности на валах, $N_{\text{впх}}$; θ_{max} – скорость полного хода корабля, уз; $C_{w_{\text{пх}}}$ – адмиралтейский коэффициент для ППХ; q_t – суммарный удельный расход топлива, воды и масла на оперативно-экономическом ходу; $\theta_{\text{эк}}$ – скорость оперативно-экономического хода; $C_{w_{\text{оэх}}}$ – адмиралтейский коэффициент для ОЭХ; R – дальность плавания на ОЭХ; D_m – массовое водоизмещение; m_{Σ} – сумма масс, не зависящих от водоизмещения и главных размерений, которая в нашем случае и будет $m_{\text{пн}}$.

Решение уравнения (7) можно найти путем подбора значения m_{Σ} ($m_{\text{пн}}$), которое обеспечит заданное значение D_m , а именно в нашем случае $D_{\text{норм}} = 9310$ т.

Облик главных двигателей детализируется в той мере, в которой можно оценить с необходимой точностью влияние вышеперечисленных схемных отличий КЭУ (факторов) и ограничений, которые гарантируют работоспособность и выполнение всех требований, предъявляемых к КЭУ. В уравнении (7) влияние облика КЭУ на D_m проявляется при изменении $q_{\text{эу}}$ и q_t . Значение кубического модуля принято по прототипу и равно $q_k = 124,3$ кг/м³. Так как топливо расходуется не только ГД, но и приводами электрогенераторов, задаются мощность электрогенерирующей установки (ЭГУ), ее состав (зависит от типа ГД), удельные расходы топлива и потребная мощность электрогенераторов на ОЭХ. Зависимость мощности электрогенерирующей установки от $D_{\text{норм}}$ принята по статистике и имеет вид

$$N_{\text{ЭГ}} = 0,7979 \cdot D_{\text{норм}} + 66,177, \quad (8)$$

где $D_{\text{норм}}$ в тоннах, а $N_{\text{ЭГ}}$ в кВт.

Удельная масса дизель-генераторов (ДГ)

$$\gamma_{\text{ДГ}} = 1039,1 N_{\text{ДГ}}^{-0,549}, \quad (9)$$

где $N_{\text{ДГ}}$ – мощность одного ДГ в кВт, а $\gamma_{\text{ДГ}}$ – в кг/кВт ($N_{\text{ДГ}} = 1000 \dots 1500$ кВт).

Удельная масса газотурбогенераторов (ГТГ):

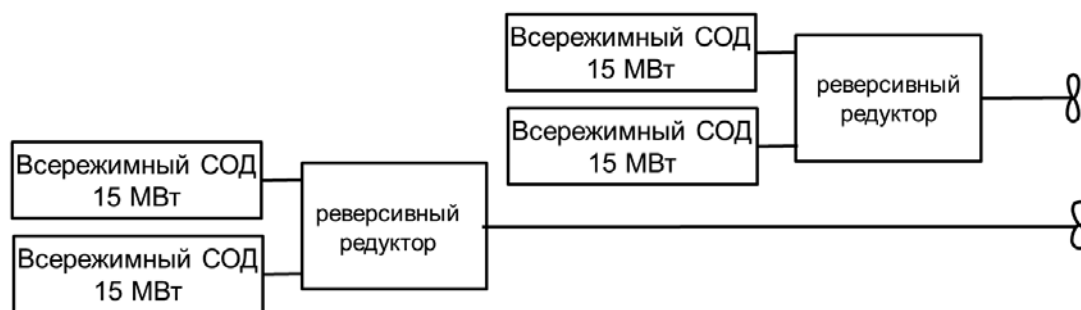


Рис. 6. Схематическое изображение агрегата КЭУ типа DAD

$$\begin{aligned} \gamma_{ГТГ} &= -0,0057N_{ГТГ} + 19,693 \text{ при } N_{ГТГ} < 1500 \text{ кВт;} \\ \gamma_{ГТГ} &= -0,00077N_{ГТГ} + 12,28754 \text{ при } N_{ГТГ} \geq 1500 \text{ кВт,} \end{aligned} \quad (10)$$

где $N_{ГТГ}$ – мощность одного ГТГ в кВт, а $\gamma_{ГТГ}$ в кг/кВт ($N_{ГТГ} = 1000 \dots 4000$ кВт).

Удельный расход топлива ДГ

$$C_{\text{дг}} = 0,3261 \cdot N_{\text{дг}}^{-0,0412}, \quad (11)$$

где $N_{\text{дг}}$ – мощность одного ДГ в кВт, а $C_{\text{дг}}$ в кг/кВт·ч ($N_{\text{дг}} = 100 \dots 4000$ кВт).

Удельный расход топлива ГТГ

$$C_{\text{гтг}} = 2,078 \cdot N_{\text{гтг}}^{-0,235}, \quad (12)$$

где $N_{\text{гтг}}$ – мощность одного ГТГ в кВт, а $C_{\text{гтг}}$ в кг/кВт ($N_{\text{гтг}} = 500 \dots 8000$ кВт).

Масса ЭГУ вычислялась по выражению

$$m_{\text{ЭГУ}} = n_{\text{ГТГ}} \cdot N_{\text{ГТГ}} \gamma_{\text{ГТГ}} + n_{\text{ДГ}} \cdot N_{\text{ДГ}} \gamma_{\text{ДГ}}, \quad (13)$$

где $n_{\text{ГТГ}}$ и $n_{\text{ДГ}}$ – количество ГТГ и ДГ соответственно, и соблюдается условие $N_{\text{ЭГ}} = n_{\text{ГТГ}} \cdot N_{\text{ГТГ}} + n_{\text{ДГ}} \cdot N_{\text{ДГ}}$.

Влияние схемы КЭУ на базовый облик корабля, для которого, как упоминалось выше, принята схема CODAD, исследовалось путем расчетов обликов кораблей с комбинированными КЭУ типа COGAG (англ. Combined Gaz and Gaz), CODAG (англ. Combined Diesel and Gaz), и всережимными КЭУ типа GAG (англ. Gaz and Gaz) и DAD (англ. Diesel and Diesel) [6]. Схема агрегата COGAG отличается от показанной на рис. 1 тем, что редукторы нереверсивные, а газотурбинные двигатели (ГТД) имеют реверсивные турбины винта. Схема всережимной КЭУ DAD показана на рис. 6. Отличие схемы всережимной КЭУ типа GAG заключается в нереверсивных редукторах и ГТД с реверсивными турбинами. Принятое значение оборотов винтов на ППХ – 300 об/мин.

Для оценки масс редукторов для дизелей была использована информация из [2]. Получены уравнения регрессии для определения удельной массы одномашинных (рис. 1) и двухмашинных (рис. 6) редукторов с использованием двухфакторного плана эксперимента первого порядка. Первый фактор – мощность, передаваемая редуктором (X_1), второй

– передаточное отношение редуктора $i_{\text{ред}} = 1,667 \dots 4,07$ (X_2). В уравнения следует подставлять кодированные факторы, вычисляемые по выражениям

$$\bar{X}_i = \frac{X_{\text{max}_i} + X_{\text{min}_i}}{2}, \quad \Delta X_i = \frac{X_{\text{max}_i} - X_{\text{min}_i}}{2}, \quad x_i = \frac{X_i - \bar{X}_i}{\Delta X_i}, \quad (14)$$

где X_i – значение фактора, соответствующее дизелю, удельная масса которого вычисляется, x_i – кодированное значение фактора.

Удельная масса одномашинного реверсивного редуктора

$$\gamma_{\text{ред1}} = (3,243782 + 0,037207 \cdot x_1 + 1,56703 \cdot x_2 + 0,031181 \cdot x_1 x_2) \cdot 0,75. \quad (15)$$

Диапазон мощности, передаваемой одномашинным редуктором, – от 3300 до 25 000 кВт.

Удельная масса двухмашинного реверсивного редуктора вычисляется по уравнению

$$\gamma_{\text{ред2}} = (4,1609207 - 0,160998 \cdot x_1 + 2,0091799 \cdot x_2 - 0,0608644 \cdot x_1 x_2) \cdot 0,476. \quad (16)$$

Диапазон мощности, передаваемой двухмашинным редуктором, – от 3300 до 32 000 кВт.

В табл. 1 приведены данные дизелей, которые использовались в расчетах для различных схем КЭУ. Для их корректного определения использовались зависимости из [7].

Для КЭУ типа COGAG в качестве форсажных были приняты ГТД 5-го поколения. Задний ход обеспечивается реверсивными турбинами винта, что учтено в удельной массе ГТД и КПД. Отличие мощностей ГТД в большую сторону от тех, которые приняты для дизелей, связано с необходимостью обеспечить скорость ППХ 30 уз в нормальных условиях в течение 10 000 ч и при высокой температуре воздуха (38 °С) – 1000 ч.

Схема агрегата CODAG отличается от схемы агрегата CODAD заменой форсажных дизелей по 25 МВт на форсажные ГТД мощностью 35,68 МВт с реверсивными турбинами и нереверсивными форсажными редукторами.

В табл. 2 приведены данные ГТД, которые использованы в расчетах для различных схем КЭУ. Использована зависимость КПД ГТД от $N_{\text{гтд}}$ из [8].

Таблица 1

Исходные данные дизелей, которые были использованы в расчетах

Схема КЭУ	Дизель	N_d , МВт	КПД %	$\gamma_{\text{диз.}}$, кг/кВт	$\gamma_{\text{диз.}}$, кг/кВт	C_d , кг/кВт·ч
CODAD	Форсажный	25	48,46	16,725	17,03	0,1738
CODAD/CODAG	Маршевый	5	42,15	4,74	5,653	0,2000
DAD	Всережимный	15	46,06	7,982	8,915	0,1829

Таблица 2

Исходные данные ГТД, которые были использованы в расчетах

Схема КЭУ	ГТД	N_g , МВт	КПД, % -1,5% реверсивная турбина	$\gamma_{\text{ГТД на раме}}$, кг/кВт	$\gamma_{\text{ГТД пош.}}$, кг/кВт	C_g , кг/кВт·ч
COGAG	Форсажный	35,68	38,62-1,5=37,12	0,47	0,586	0,227
COGAG	Маршевый	7,75	33,68-1,5=32,18	0,826	1,069	0,262
GAG	Всережимный	21,5	37,27-1,5=35,77	0,554	0,700	0,235

Массы главных двигателей, которые были приняты к расчету

Тип двигателя	N_d , МВт	Масса m , кг		
		сухая (ISO)	на раме	полная
Дизель:				
– форсажный	25	401620	418 117	425 824
– маршевый	5	23683	27 249	28 267
– всережимный	15	119727	128 436	133 730
ГТД:				
– форсажный	35,68	–	26 480	30 587
– маршевый	7,752	–	6 407	8 284
– всережимный	21,716	–	1505	19 627

Данные масс главных двигателей, которые были приняты к расчету, приведены в табл. 3.

Оценка массы редукторов для ГТД была выполнена по удельной массе, получаемой по статистическим зависимостям, построенным по данным редукторов НПКГ «Зоря» – «Машпроект» (рис. 7).

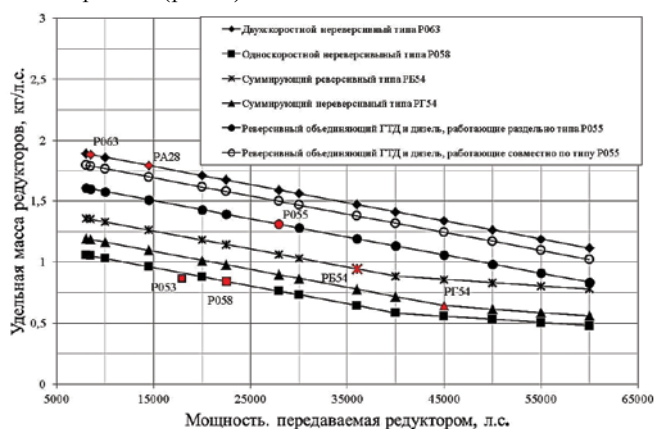


Рис. 7. Зависимости удельной массы редукторов для КЭУ с ГТД

В табл. 4 приведены данные редукторов, полученные по выражениям (14) и (15) и по зависимостям рис. 7.

Ряд статей нагрузки, зависящих от схемы КЭУ и типа ГД и влияющих на массу полезной нагрузки (условие $D_{\text{норм}} = \text{const}$), не включается в статью нагрузки КЭУ. К ним относятся массы акустической защиты (амортизационные платформы, опоры, амортизаторы) маршевой и форсажных частей КЭУ и ЭГУ, массы воздухопроводов и газоходов, массы дымовых труб. Акустическая защита маршевой части КЭУ и ЭГУ должна позволять возможность выполнения задач ПЛО. Так как на ходах, которые обеспечивают форсажные двигатели, шум собственных винтов не позволяет вести поиск подводных лодок, для форсажных ГТД определялась только масса амортизаторов и опор. Исключение составляют форсажные дизели мощностью 25 МВт схемы CODAD. Их требуется устанавливать на амортизационные платформы для уменьшения вибраций корпусных конструкций на полном ходу. Во всережимных КЭУ акустической защитой оснащались все ГД. Основной составляющей массы акустической защиты являются массы амортизационных платформ, результаты определения которых для разных схем КЭУ приведены в табл. 5 и табл. 6. Для косвенной оценки массы амортизационной платформы рассчитаны их коэффициенты массы, представляющие собой отношение массы амортизационной платформы к массе части агрегата, установленной на ней.

Таблица 4

Исходные данные редукторов, используемые в расчетах

Схема КЭУ	Редуктор	N_d , кВт	$i_{\text{ред}}$	Формула, рисунок	$\gamma_{\text{ред1}}$, кг/кВт	$m_{\text{ред1}}$, кг
CODAD	Форсажный	25000	1,955	(14)	1,656	41416
CODAD/ CODAG	Маршевый	5000	4,333	(14)	2,601	13006
DAD	Всережимный	2×15000	2,949	(15)	1,913	61221
COGAG	Форсажный	35680	–	Рис. 7	0,758	27027
COGAG	Маршевый	7753	–	Рис. 7	2,518	19552
GAG	Всережимный	2×21716	–	Рис. 7	0,793	34453

Таблица 5

Массы амортизационных платформ для разных схем КЭУ с ГТД

Масса	Схема		
	CODAG	COGAG	GAG
Коэффициент массы платформы:			
– маршевой части	0,687	0,538	0,500
– форсажной части	0,0165	0,0165	0,4181
– ЭГУ	0,363	0,300	0,300
Масса платформы, т:			
– под маршевую часть агрегата	63,201	38,758	67,794
– под форсажную часть агрегата	2,036	2,036	16,455
– под все агрегаты	65,237	40,794	84,249
– под ЭГУ	56,419	28,278	28,281
Итого масса платформ, т	121,655	69,072	112,530

Масса	Схема		
	CODAD	CODAG	DAD
Коэффициент массы: – маршевой части	0,803	0,687	0,368
– форсажной части	0,227	0,0165	0,224
– ЭГУ	0,363	0,363	0,363
Масса платформы, т: – под маршевую часть агрегата	68,381	63,201	146,641
– под форсажную часть агрегата	261,498	2,036	61,803
– под все агрегаты	329,880	65,237	208,444
– под ЭГУ	56,419	56,419	56,419
Итого масса платформ, т	386,298	121,655	264,862

Расчет облика корабля в первом приближении выполнялся по методу, изложенному в [8–10]. Решалось уравнение (7).

Так как в данном конкретном случае при решении уравнения (7) выполняется условие $D_m = \text{const}$, то сумма масс КЭУ, топлива, электрогенерирующей установки и полезной нагрузки также сохраняется постоянной. Ее численное значение (в выполненных расчетах) равно 3482 ± 10 т, что составляет 37,406% ($\pm 0,108\%$) от $D_{\text{норм}}$. Полученное значение весьма близко к таковому корабля пр.1134Б, которое равно 37,31%.

Составляющие полной массы КЭУ и масса ЭГУ, которые определяют массу полезной нагрузки кораблей с различными схемами КЭУ, показаны на рис. 8. Результаты расчета принятого критерия целевой эффективности $m_{\text{пл}}$ для заданных схем КЭУ приведены на рис. 9.

Наибольшее значение $m_{\text{пл}}$ получено для схемы CODAG (см. рис. 8). Экономичный маршевый двигатель (дизель) и легкий форсажный двигатель (ГТД) имеют наименьшую суммарную массу КЭУ, топлива и ЭГУ, что обеспечило максимум относительной $\bar{m}_{\text{пл}}$ (18,80% от $D_{\text{норм}}$). На втором месте схема COGAG. Несмотря на больший расход топлива, чем у схемы CODAD, значительно меньшая масса КЭУ позволяет иметь относительную массу $\bar{m}_{\text{пл}} = 17,41\%$.

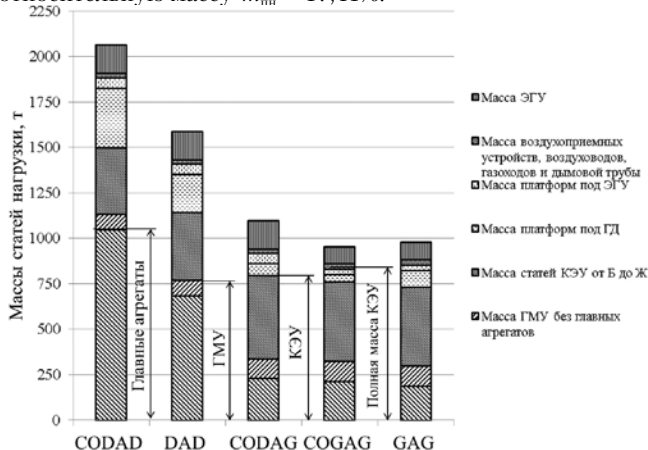


Рис. 8. Составляющие полной массы КЭУ и масса ЭГУ, которые определяют массу полезной нагрузки кораблей с различными схемами КЭУ

Применение всережимной схемы GAG практически не влияет на массу КЭУ (меньше, чем масса КЭУ COGAG на 3,18%). Однако при движении на ОЭХ ГТД схемы GAG работают на долевом режиме и удельный расход топлива больше на 23%, чем у маршевых ГТД схемы COGAG. Относительная масса составила $\bar{m}_{\text{пл}} = 15,64\%$.

Сравнение полученных значений $\bar{m}_{\text{пл}}$ кораблей, в состав КЭУ которых входят ГТД, с фактическими значениями $\bar{m}_{\text{пл}}$ кораблей с ГТД II поколения, показывает хо-

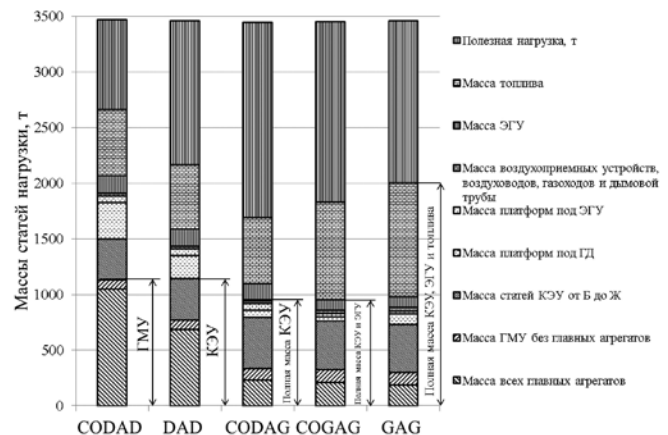


Рис. 9. Сумма масс топлива, ЭГУ, полной массы КЭУ и полезной нагрузки кораблей с различными схемами КЭУ

рошее их соответствие (пр. 1135 $\bar{m}_{\text{пл}} = 15,85\%$ и пр. 1134Б $\bar{m}_{\text{пл}} = 13,56\%$ [11, 12]).

Схема КЭУ CODAD, которая была принята за базовую, имеет худшее значение $m_{\text{пл}} = 8,68\%$. У этого варианта наибольшая масса КЭУ. Масса всережимной дизельной КЭУ (DAD) оказывается меньше, чем по схеме CODAD из-за резкого роста удельной массы дизеля при увеличении мощности от 15 до 25 МВт (табл. 1 и табл. 3). Расход топлива с учетом затрат на производство электроэнергии также меньше на 2,25% (табл. 7). Эти данные объясняют, почему в составе дизельных КЭУ используются только 2 или 4 дизеля одинаковой мощности.

Таблица 7

Сравнение расхода топлива кораблей с дизельными КЭУ

Характеристика	Схема КЭУ	
	CODAD	DAD
Мощность маршевого дизеля номинальная, кВт	5000	15000
КПД на номинальном режиме	0,4215	0,4606
Удельный расход топлива на номинальном режиме, кг/(кВт. ч)	0,1470	0,1345
Коэффициент, учитывающий изменение ζ_e на режиме ОЭХ	1,0015	1,0622
Удельный расход топлива на режиме ОЭХ, кг/(кВт.ч)	0,1472	0,1429
Расход топлива на дальность плавания 4100 миль, т	595	582

Приведенные на рис. 9 результаты расчетов показывают, что целевая эффективность корабля океанской зоны водоизмещением до 10 000 т с КЭУ больше у корабля, в составе КЭУ которого имеются форсажные ГТД. Дальность плавания на 30 уз больше у кораблей с ГТД благодаря большему запасу топлива (табл. 8).

Таблица 8

Дальности плавания на 30 уз ($N_{\text{плх}} = 60 \text{ МВт}$)

Характеристика	Схема КЭУ				
	CODAD	DAD	CODAG	COGAG	GAG
Запас топлива при $D_{\text{норм}}$, т	595,08	581,66	595,08	874,21	1024,89
Дальность плавания, миль	1500	1430	1156	1912	1938
Удельный расход топлива ГД, кг/(кВт ч)	0,2087	0,2139	0,2707	0,2405	0,2782

Большие запасы топлива кораблей с КЭУ типа COGAG компенсируются малой массой КЭУ, что обеспечивает лучшую целевую эффективность. Наибольшее значение целевой эффективности получено для КЭУ типа CODAG, так как большая масса маршевого дизеля слабо влияет на общую массу КЭУ, а расход топлива не отличается от такового для схем КЭУ типа CODAD.

В качестве примера оценки чувствительности к исследуемым факторам рассмотрим влияние средней удельной массы главных двигателей (так как удельные массы маршевых и форсажных двигателей отличаются друг от друга) на массу полезной нагрузки (ПН). Первоначально оценивалось влияние удельной массы ГТД на ПН для корабля с $D_{\text{норм}} = 9309,793 \text{ т}$. Была вычислена средняя удельная масса ГТД ГЭУ типа COGAG. Масса ГТД на раме, маршевых и форсажных, суммировалась и делилась на $N_{\text{гэу}}$. Для принятых зависимостей эта величина составила $\gamma_{\text{ГТД}} = 0,557 \text{ кг/л.с.}$

Далее были приняты значения $\gamma_{\text{ГТД}} = 0,3; 0,5; 0,8$ и $1,3 \text{ кг/л.с.}$ Верхнее значение было задано на 1 кг/л.с. больше, чем минимальное с тем, чтобы численно оценить влияние $\gamma_{\text{ГТД}}$ при ее изменении на единицу. Результаты расчета приведены в табл. 9.

Таблица 9

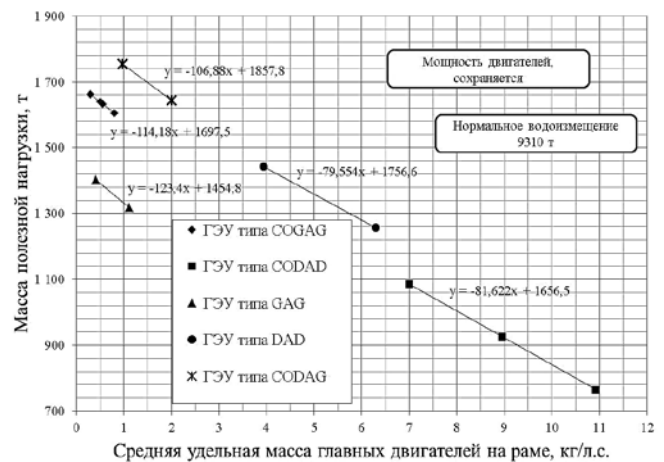
Оценка влияние $\gamma_{\text{ГТД}}$ на ПН для корабля с КЭУ COGAG, $D_{\text{норм}} = 9309,793 \text{ т}$

Характеристика	Значение $\gamma_{\text{ГТД}}$				
	0,3	0,5	0,556911	0,8	1,3
Масса ПН, т	1663,23	1640,40	1633,91	1606,14	1548,97
Разность ПН, т	29,33	6,50	0	-27,76	-84,94
Удельная масса агрегата, кг/л.с.	1,50	1,70	1,757	2,00	2,50
Масса машинной установки, т	823	847	854	882	941

Аналогичные расчеты были выполнены для схем ГЭУ CODAD, DAD, CODAG и GAG. Результаты приведены на рис. 10.

Из показанных на рис. 10 зависимостей можно сделать вывод, что влияние уменьшения удельной массы ГД на увеличение ПН в полтора раза сильнее у ГЭУ, в составе которых есть ГТД. Однако достигнутый уровень весового совершенства корабельных ГТД, с одной стороны, не позволяет рассчитывать на значительное увеличение ПН за счет уменьшения удельной массы, а с другой – увеличение удельной массы $\gamma_{\text{ГТД}}$ на 44% снизит ПН всего на 27,76 т, или на 1,7% (см. табл. 9) в схеме COGAG, что является важным преимуществом в сравнении со схемами CODAD и DAD. Такое же снижение ПН в схеме CODAD произойдет при увеличении удельной массы $\gamma_{\text{Дизер}}$ на всего на 3,1%.

Расчеты по оценке влияния удельной массы ГД на увеличение скорости от 30 уз до самого полного хода показали, что оно сильнее в 2,5 ... 3,8 раза для кораблей с ГЭУ типа GAG и COGAG, чем для ГЭУ типа DAD и CODAD.

Рис. 10. Влияние $\gamma_{\text{ГТД}}$ на массу ПН кораблей с различными схемами ГЭУ

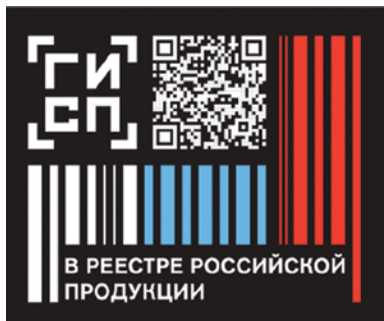
ВЫВОД

Разработанный метод оценки влияния типа главных двигателей корабельной энергетической установки и ее схемы на целевую эффективность корабля при исследовательском проектировании демонстрирует хорошую чувствительность к рассмотренным факторам, характеризующим ее облик: схемы (рассмотрено пять схем), типа главного двигателя (дизель и ГТД), способа передачи мощности к движителям (с межредукторной перекидкой и без нее). Метод можно использовать для определения зон целесообразного применения различных типов ГД кораблей дальней морской и океанской зоны.

ЛИТЕРАТУРА

- Худяков Л. Ю. Исследовательское проектирование кораблей. – Л.: Судостроение, 1980. – 240 с.
- Гайкович А. И. Теория проектирования водоизмещающих кораблей и судов. – В 2 т. – Т. 1: Описание системы «Корабль». – СПб.: Изд-во НИЦ МОРИНТЕХ, 2014. – 819 с.
- Столяров С. П., Столяров А. С., Пролева А. В., Фёдоров О. М. О векторе развития корабельных энергетических установок // Морской вестник. – 2023. – №4 (88). – С.1 – 5.
- Позодин Ю. М., Безухов А. П. Проблемы создания паровых турбин для компактных атомных энергетических установок кораблей с электродвижением // Тр. СПбМТУ. – 2023. – № 4 (8). – С. 82–88.
- Гордон Л. А. Расчет водоизмещения и основных размеров корабля. – Л.: Судпромгиз, 1955. – 176 с.
- Буров М. Н., Пономарев В. А. Тенденции развития зарубежных корабельных главных энергетических установок. – Корабельная энергетика из прошлого в будущее. – Мат-лы Всеросс. науч.-техн. форума, СПб. – 2018. – С. 247 – 250.
- Позодин Ю. М., Безухов А. П. Оценка внешних параметров поршневых и газотурбинных двигателей на ранних стадиях проектирования морской энергетической установки // Журнал «Судостроение». – 2024. – №4. – С. 60–66.
- Буров М. Н., Пономарев В. А. Метод расчета критерия эффективности морских ГТД в составе энергетической установки при выборе их облика // Вестник РГАТУ. – Рыбинск: Изд. РГАТУ, 2020. – № 4(55). – С. 3 – 12.
- Буров М. Н., Пономарев В. А. Метод выбора облика морских ГТД и состава главной энергетической установки для кораблей различных типов на базе унифицированных технических решений. – Мат-лы 10-й Международ. науч.-техн. конфер. «Актуальные проблемы морской энергетики», СПб., Изд. СПб МГТУ 2021. – С. 19–22.
- Буров М. Н. Расчет стоимости жизненного цикла корабля для выбора облика морских ГТД и главной энергетической установки. Св. о гос. регистрации программ для ЭВМ РФ № 2022667918. Зарегистрировано 28.09.2022.
- Машенский С. Н. Великолепная семерка. Крылья «Беркутов». Большие противолодочные корабли проекта 1134Б, вертолеты Ка-25. – М.: Военная книга, 2007. – 80 с.
- Васильев П. А., Машенский С. Н. Корабль как птица. – М.: Военная книга, 2009. – 104 с. ■

25 июля 2026 г. машиностроительное предприятие «Винета» отметило 30-летие. За эти десятилетия компания прошла путь от объединения судостроителей и специалистов в области аквакультуры до российского разработчика и производителя сложного оборудования для флота, атомной и нефтегазовой промышленности. Сегодня под маркой «Винета» работают собственное конструкторское бюро, производственные и испытательные площадки, заводская лаборатория, система контроля качества и сервисное сопровождение оборудования на протяжении всего срока эксплуатации.



Знак «Российская промышленная продукция»

НАЧАЛО ПУТИ

История «Винеты» началась 25 июля 1996 г. Предпосылкой для создания предприятия стала инженерная идея подводного садкового устройства, предназначенного для промышленного выращивания рыбы в открытых акваториях. В первый коллектив вошли специалисты-судостроители и эксперты в области аквакультуры. Однако уже на начальном этапе стало очевидно, что накопленные компетенции позволяют решать значительно более широкий круг задач, связанных с проектированием и изготовлением судового комплектующего оборудования.

С августа 1996 г. я возглавил «Винету» как ее основатель. Одним из его ближайших соратников был инженер-кораблестроитель Виталий Юрьевич Макаров. Он пришел в компанию 1 августа того же года, работал заместителем, а затем советником директора и внес значительный вклад в создание оборудования топливоподготовки, установок подготовки тяжелого топлива и комплексов очистки судовых сточных и нефтесодержащих вод.

Название предприятия оказалось символичным. Работа «Винеты» с первых лет была связана с морем, кораблестроением и практическими задачами флота. Компания создавалась для обеспечения судостроителей и судоремонтных предприятий качественной отечественной арматурой, фильтрами, теплообменными аппаратами, системами подготовки топлива и воды. Именно ориентация на реальные потребности заказчиков стала одним из главных направлений дальнейшего развития предприятия.

ОТ ЧЕРТЕЖА ДО СЕРВИСНОГО ОБСЛУЖИВАНИЯ

Одним из ключевых достижений «Винеты» явилось формирование производства полного цикла. Большинство изделий начинается с разработки конструкторской документации в собственном инженерном центре. Далее технологические службы определяют последовательность изготовления, подбирают материалы и комплектующие, выполняют заготовительные операции, ведутся механическая обработка, сварка и сборка.

На каждом этапе производства проходит контроль: проверяются исходные материалы, геометрические параметры,

ВЕРНЫЙ КУРС ООО «ВИНЕТА» ОТ ИНЖЕНЕРНОЙ ИДЕИ ДО ПРЕДПРИЯТИЯ ПОЛНОГО ЦИКЛА

*И. С. Суховинский, директор ООО «Винета»,
контакт. тел. (812) 493 5048*

качество сварных соединений, плотность и герметичность оборудования, работа систем управления. После испытаний и необходимой сертификации изделие передается заказчику, а подразделения сервиса и гарантии сопровождают его на протяжении жизненного цикла.

Такой подход особенно важен в судовом машиностроении. Оборудование должно сохранять работоспособность в условиях вибрации, качки, повышенной влажности, воздействия морской воды и значительных перепадов температур. Поэтому собственные испытательные возможности и непосредственное участие разработчика в изготовлении позволяют не только контролировать качество, но и оперативно адаптировать продукцию под конкретный проект судна или требования эксплуатирующей организации.

Линейка проектируемых и выпускаемых предприятием изделий насчитывает более тысячи наименований. Это и системы водоочистки и водоподготовки, оборудование подготовки топлива и масла, теплообменные аппараты, фильтры для различных сред, системы газо- и воздухоочистки, судовая арматура, оборудование водоснабжения.

РАЗВИТИЕ ПРОИЗВОДСТВЕННОЙ БАЗЫ

Рост номенклатуры был бы невозможен без последовательной модернизации производства. Масштабное техническое перевооружение предприятия началось в 2015 г. В 2017 г. была введена в эксплуатацию вторая производственная площадка, на которой разместились лаборатория неразрушающего контроля, участки автоматической и лазерной сварки, производство маломерных композитных судов.

Производственные возможности предприятия позволили реализовать ряд технически сложных проектов. В разные



Пульт управления стенда пневмо- и гидроиспытаний

годы специалисты «Винеты» разрабатывали и поставляли телескопические ворота вертолетного ангара, крупногабаритные фильтры заборной воды из медно-никелевого сплава, специальное оборудование для оффшорных добывающих платформ и другое нестандартное оборудование.

ИМПОРТОЗАМЕЩЕНИЕ КАК ИНЖЕНЕРНАЯ РАБОТА

Особое место в истории предприятия занимает создание отечественного оборудования, которое ранее в значительной степени поставлялось зарубежными производителями. В 2015 г. «Винета» за счет собственных средств приступила к разработке установок очистки судовых сточных и нефте-содержащих вод.

Созданные предприятием системы должны были не просто заменить импортные образцы по габаритам и присоединительным размерам, но и соответствовать требованиям экологической безопасности, классификационных обществ и конкретным проектам кораблей и судов. Установки очистки сточных вод прошли испытания под надзором Российского морского регистра судоходства и получили подтверждение соответствия международным требованиям.

Новый этап этой работы связан с созданием центробежных модульных сепараторов топлива и масла, блоков подготовки тяжелого топлива и обновленной линейки установок очистки сточных вод. Оборудование было разработано с учетом возможности установки как на строящиеся, так и на модернизируемые суда.

Блок подготовки тяжелого топлива обеспечивает требуемые параметры температуры и вязкости перед подачей топлива к судовому двигателю. Центробежные сепараторы предназначены для удаления воды и механических примесей из топлива и масла. Установки очистки сточных вод могут применяться в гравитационных и вакуумных судовых системах. Представленные компанией изделия получили документы Российского морского регистра судоходства и заключения Минпромторга России о соответствии требованиям Постановления Правительства № 719.

Для «Винеты» импортозамещение стало не временной реакцией на изменение рынка, а продолжением изначально



Изготовление прочной цистерны для сыпучего груза

выбранной модели: собственная разработка, изготовление на российских производственных мощностях, проведение испытаний и доступное заказчику сервисное обслуживание. Отказ ряда иностранных поставщиков от работы в России только подчеркнул значение этой модели для бесперебойного строительства, ремонта и эксплуатации флота.

ОТ СУДОСТРОЕНИЯ – К НЕФТЕГАЗОВЫМ ПРОЕКТАМ

К своему тридцатилетию предприятие существенно расширило сферу деятельности. Наряду с судостроением и судоремонтом «Винета» развивает поставки для нефтегазового сектора, морских добывающих платформ и судов обеспечения.

Одним из новых направлений стало изготовление крупногабаритных резервуаров для хранения технологических и буровых сред. Для выполнения таких заказов предприятие приобрело оборудование для сварки поверхностей больших размеров и диаметров под флюсом. Разработаны и поставлены системы подготовки питьевой воды и очистки стоков для морских нефтегазовых объектов. При этом используются накопленные судостроительные компетенции для обеспечения устойчивости оборудования к вибрациям, низкого уровня шума, компактности, ремонтпригодности и возможности длительной автономной эксплуатации.

Освоение новых рынков не означает отказа от основного профиля. Напротив, опыт работы для нефтегазовой отрасли, которая предъявляет более сложные требования к производству оборудования, усиливает конструкторскую, испытательную и производственную базу компании, а полученные решения могут в дальнейшем применяться и в судостроении.

КАЧЕСТВО ПОЛУЧИЛО ПОДТВЕРЖДЕНИЕ

Важным итогом развития предприятия стали результаты аудита Группы Объединенной судостроительной корпорации, проведенного в 2025 г. Специалисты ОСК, ПАО «Газпром» и ПАО «НК «Роснефть» оценивали производственные возможности, технический потенциал и систему менеджмента качества предприятия.

По результатам аудита «Винета» как поставщик получила 99 баллов из 100 и категорию «А», соответствующую низкой степени риска. Продукция предприятия была рекомендована для включения в ведомости заказа при проектировании, строительстве, ремонте и модернизации кораблей, судов и морской техники.

Эта оценка стала подтверждением системной работы, которая начинается задолго до выпуска готового изделия: с подготовки инженеров, аттестации технологий и контроля материалов и заканчивается испытаниями и поддержкой оборудования непосредственно при эксплуатации.



Бункер для сбора и передачи пыли



Установка для очистки нефтесодержащих вод СНЛВ-5,0

ГЛАВНЫЙ КАПИТАЛ – ЛЮДИ

История «Винеты» – это прежде всего история ее коллектива. Сегодня численность работников предприятия достигла 500 человек. Среди сотрудников компании – лауреаты отраслевых конкурсов «Инженер года» и «Молодой кораблестроитель – инженер года», квалифицированные конструкторы, технологи, сварщики, токари, специалисты технического контроля и сервисных подразделений.

Предприятие поддерживает преемственность поколений, проводит экскурсии и профориентационные мероприятия для школьников и студентов, взаимодействует с профильными учебными заведениями. Культура производства, слаженность коллектива сказываются и за пределами цехов: команда «Винеты» неоднократно становилась победителем отраслевых

и всероссийских соревнований в спорте, например по настольному теннису и бильярду.

ТРИДЦАТЬ ЛЕТ – ОСНОВА ДЛЯ НОВОГО ЭТАПА

Юбилей «Винеты» приходится на период, когда российскому судостроению особенно необходимы устойчивые отечественные поставщики. От надежности комплектующего оборудования зависят сроки строительства судов, безопасность экипажей, экологические характеристики флота и возможность его обслуживания на протяжении десятилетий.

К своему 30-летию «Винета» подходит с собственной инженерной школой, современной производственной базой, испытательными и лабораторными возможностями, сертифицированными линейками оборудования и опытом работы над крупнейшими судостроительными, атомными и промышленными проектами.

Предприятие продолжает участвовать в формировании отраслевой повестки. В 2025 г. «Винета» выступила партнером деловой программы выставки «Нева», организовав профессиональное обсуждение развития отечественного судового оборудования и решений для морской нефтегазовой отрасли. В апреле 2026 г. директор компании участвовал в работе Морского совета при Губернаторе Ленинградской области, где продукция предприятия была представлена участникам первого заседания.

Три десятилетия для машиностроительного предприятия – это тысячи выполненных заказов, сотни инженерных решений и огромный объем знаний, который невозможно накопить иначе, чем реальной работой. Это не только пройденный путь, а прочная основа для новых разработок, новых производственных возможностей и новых кораблей и судов, на которых будет работать оборудование с маркой «Винета». Сохраняя верность выбранному курсу разрабатывать, производить и отвечать за результат, «Винета» вступает в четвертое десятилетие своей истории. ■



Стенд предприятия на выставке «Нева»

Прогнозирование отказов корабельных комплексов связи играет важную роль в их эффективном применении и позволяет операторам принимать превентивные меры для предотвращения непредвиденных простоев оборудования и планировать использование ресурсов более эффективно. Зная, какие средства или компоненты в комплексе связи подвержены отказам, их можно зарезервировать, провести дополнительное техническое обслуживание или оперативно заменить на новые. Это помогает избежать срочных и внеплановых ремонтов в процессе автономного похода корабля, оптимизировать использование ресурсов, а также повысить качество и устойчивость связи. Благодаря такой возможности операторы корабельных комплексов связи могут заранее информировать предприятие-изготовитель о предстоящих работах, ремонтах или простоях оборудования [1, 2].

Предсказание отказов основывается на применении моделей машинного обучения. Сравнение моделей машинного обучения для предсказания отказов средств связи может быть выполнено на основе различных метрик оценки качества моделей и их производительности. Модели машинного обучения, используемые для предсказания отказов, имеют ключевые особенности:

1. *Логистическая регрессия* применяется для моделирования бинарных зависимостей, где зависимая переменная принимает значения «отказ» и «не отказ». Логистическая регрессия обобщает линейную регрессию и использует логистическую функцию для прогнозирования вероятности отказа. Модель имеет следующие особенности:

- простая и интерпретируемая модель основана на логистической функции;
- хорошо подходит для бинарной классификации (отказ/не отказ), основанной на наборе признаков;
- чувствительна к линейной зависимости и может недостаточно быстро улавливать сложные нелинейные взаимосвязи.

2. *Решающие деревья* являются графическими моделями, используемыми для принятия решений или классификации объектов на основе набора входных признаков. Они описывают структуру в виде дерева, где каждый узел представляет собой тест на один из входных признаков. Каждое ребро представляет возможные значения этого признака, а каждый лист дерева – конечное решение или классификацию. Модель имеет следующие особенности:

- легко обрабатывает большие наборы категориальных признаков

ОДИН ИЗ ПОДХОДОВ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ВРЕМЕНИ ОТКАЗА ЭЛЕМЕНТОВ КОРАБЕЛЬНОГО АВТОМАТИЗИРОВАННОГО КОМПЛЕКСА СВЯЗИ ВМФ

А. А. Катанович, д-р техн. наук, проф., заслуженный деятель науки РФ, заслуженный изобретатель РФ, гл. науч. сотрудник НИИ ОСИС ВМФ ВУНЦ ВМФ «ВМА им. Н. Г. Кузнецова»,

К. В. Гольдибаев, ген. директор,

А. В. Сорокин, зам. ген. директора – гл. конструктор, АО «ПКБ «РИО»,

В. А. Цыванюк, канд. воен. наук, ст. науч. сотрудник

НИИ ОСИС ВМФ ВУНЦ ВМФ «ВМА им. Н. Г. Кузнецова»,

контакт. тел. +7 (921) 318 4607, (812) 313 6181, (812) 313 6181,

+7 (911) 2673827,

andrei.katanovitch@yandex.ru, rio@pkb-rio.com, ciwoniuk@mail.ru

и обнаруживает нелинейные зависимости;

- имеет склонность к переобучению на сложных данных.

3. *Случайный лес* – это модель машинного обучения, основанная на комбинировании нескольких решающих деревьев в одну модель. Каждое дерево формируется независимо от других на подмножестве обучающих данных и случайно отобранных признаков. При принятии решения случайный лес объединяет предсказания всех деревьев и выбирает наиболее частое в качестве окончательного результата. Такое комбинирование деревьев позволяет снизить вероятность переобучения и улучшить обобщающую способность модели. Случайный лес может использоваться как для задач классификации, так и для регрессии и широко применяется в различных областях. Модель имеет следующие особенности:

- способна улавливать сложные взаимосвязи в исследуемых данных и предотвращать переобучение модели;
- может потребовать значительных вычислительных ресурсов для обучения и предсказания.

4. *Градиентный бустинг* – это модель машинного обучения применяется для построения ансамбля относительно слабых моделей (например, решающих деревьев), которые последовательно улучшаются с помощью градиентного спуска. В отличие от случайного леса, где деревья обучаются независимо друг от друга, в градиентном бустинге модель строится итеративно (каждое следующее дерево пытается исправить ошибки предыдущего). Модель имеет следующие особенности:

- представляет последовательность слабых моделей, исправляющих ошибки предыдущих моделей;
- хорошо работает на больших наборах данных и способна моделировать сложные взаимосвязи;
- может потребовать значительных вычислительных ресурсов для обучения и предсказания, а также настройки гиперпараметров.

5. *Нейронные сети* – это метод машинного обучения, предназначенный для обработки информации и принятия решений. Модели на базе нейронных сетей состоят из множества взаимосвязанных нейронов, которые работают совместно для решения поставленных задач. Нейронные сети принимают входные данные и передают их через слои нейронов. Каждый нейрон преобразует входные данные и передает результаты следующему слою, пока не будет получен окончательный результат. Модель имеет следующие особенности:

- способна обрабатывать большие объемы данных и моделировать сложные взаимосвязи;
- может потребовать значительных вычислительных ресурсов для обучения и предсказания, а также настройки гиперпараметров;
- глубокая модель с большим количеством слоев улавливает сложные зависимости в данных.

При выборе модели необходимо учитывать следующие ее аспекты:

- производительность на исторических данных, используемых для обучения и тестирования;
- способность к обработке и анализу различных типов признаков, особенностей данных о средствах связи;
- интерпретируемость и возмож-

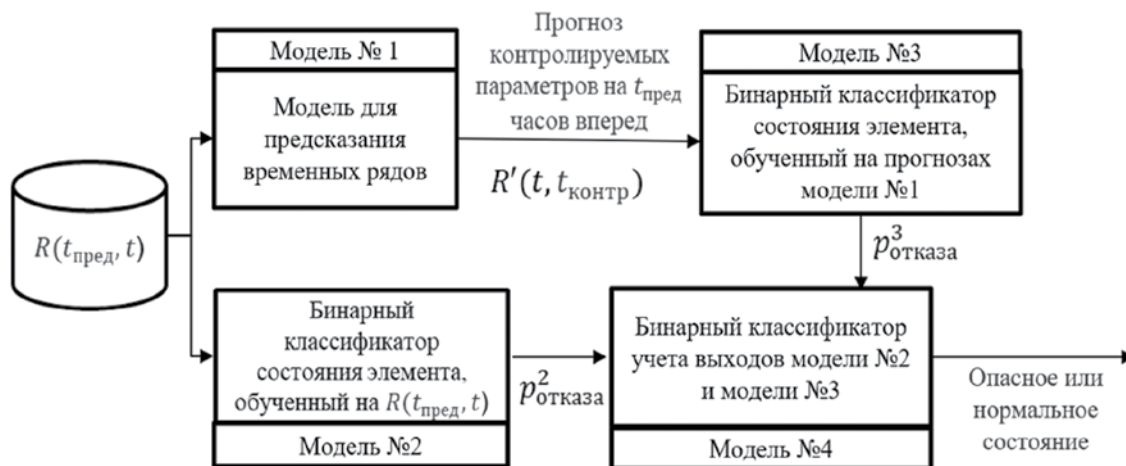


Рис. 1. Ансамблевая модель классификации состояния элемента комплекса связи

- сложность и вычислительные ресурсы, необходимые для обучения и предсказания моделей;
- устойчивость к различным типам шума и изменениям в данных.

Выбор модели машинного обучения для каждого отдельного устройства является частной задачей и зависит от нескольких факторов:

1. Типа задачи. В зависимости от типа задачи, такого как классификация, регрессия, кластеризация или детектирование аномалий, выбирается соответствующая модель. Например, для классификации могут применяться логистическая регрессия, решающие деревья или нейронные сети.

2. Размера и характера данных. Они могут влиять на выбор модели. Для больших объемов данных могут быть использованы модели, способные обрабатывать данные эффективно. Например, стохастический градиентный спуск или сверточные нейронные сети для обработки изображений. Важно учитывать наличие пропущенных значений или шума в данных. Некоторые модели более устойчивы к таким факторам. Зависимости и взаимодействия между признаками также могут влиять на выбор модели. Если имеются сложные нелинейные зависимости, то предпочтительны более гибкие модели, такие как нейронные сети или градиентный бустинг. Если же зависимости не носят сложный характер, то могут быть применены более простые модели, такие как линейная регрессия.

3. Интерпретируемости. Если важно иметь интерпретируемую модель, то можно выбрать простые модели, такие как линейная регрессия или решающие деревья. Более сложные модели, такие как нейронные сети или случайный лес, могут обладать большей предсказательной мощностью, но мо-

гут быть менее интерпретируемыми.

4. Времени и вычислительных ресурсах. Время обучения и требования к вычислительным ресурсам могут быть важными факторами при выборе модели. Некоторые модели, такие как нейронные сети со сложными архитектурами, могут требовать больших вычислительных ресурсов и времени для обучения, в то время как более простые модели могут быть более экономичными в этом отношении.

На рис. 1 представлена возможная ансамблевая модель для оценки состояния элементов комплекса связи. Пусть $R(a, b)$ – статистический массив данных о контролируемых параметрах устройства за временной промежуток (a, b) . Пусть $R(t_{пред}, t)$ – массив данных об показателях функционирования исследуемого элемента за время от $t_{пред}$ до текущего времени t , а $R'(t, t_{контр})$ – предсказания состояния элемента для времени от t до $t_{контр}$.

Ансамблевая модель состоит из четырех подмоделей. Исходный массив исторических данных подается в модели № 1 и № 2.

Модель № 1 – это модель предсказания временных рядов. В качестве нее может быть использован классический линейный регрессор либо более сложная рекуррентная нейронная сеть. Задача модели максимально точно предсказать изменение характеристик исследуемого элемента в течение последующих $t_{контр}$ часов. Результатом работы модели является массив прогнозов $R'(t, t_{контр})$.

Модель № 2 – это бинарный классификатор, обученный на исторических данных о состоянии элемента и возникших отказах. Модель принимает на вход массив характеристик элемента за $t_{пред}$ часов, предшествующих текущему моменту времени t , и на основании этих данных рассчитывает вероятность нахождения элемента в опасном состоянии $p^2_{отказа}$.

Массив предсказаний $R'(t, t_{контр})$, полученный от модели № 1, отправляется в модель № 3.

Модель № 3 – это бинарный классификатор, обученный на прогнозах модели № 1. Модель принимает на вход массив предсказаний $R'(t, t_{контр})$, полученный от модели № 1, и на основании этих данных рассчитывает вероятность нахождения элемента в опасном состоянии $p^3_{отказа}$.

Прогнозы моделей № 2 и № 3 передаются в модель № 4.

Модель № 4 – это бинарный классификатор, имеющий два входа и обученный на прогнозах моделей № 2 и № 3. Модель нужна для того, чтобы более точно учесть важность прогнозов, даваемых предыдущими моделями. По результатам формируется единый прогноз, который доводится до оператора.

Качество и точность работы предлагаемой модели зависят от многих факторов и прежде всего от характеристик исследуемого элемента, количества и качества собранных исторических данных, применяемых для обучения. Кроме того, качество работы модели зависит от выбранных значений $t_{пред}$ и $t_{контр}$. При увеличении времени, за которое мы хотим предсказать отказ, растет и вероятность ложной тревоги. С другой стороны, при недостаточных данных для обучения увеличивается вероятность необнаружения опасного состояния. Подбор данных параметров является отдельной исследовательской задачей для каждого элемента комплекса связи.

Главная задача прогнозирования отказов – это предупредить оператора об опасном состоянии элемента комплекса связи, чтобы он мог заранее предпринять действия для минимизации последствий отказа. При расчете надежности исследовался комплекс связи при автономном походе, то есть при отказе средства связи и невозможности устра-

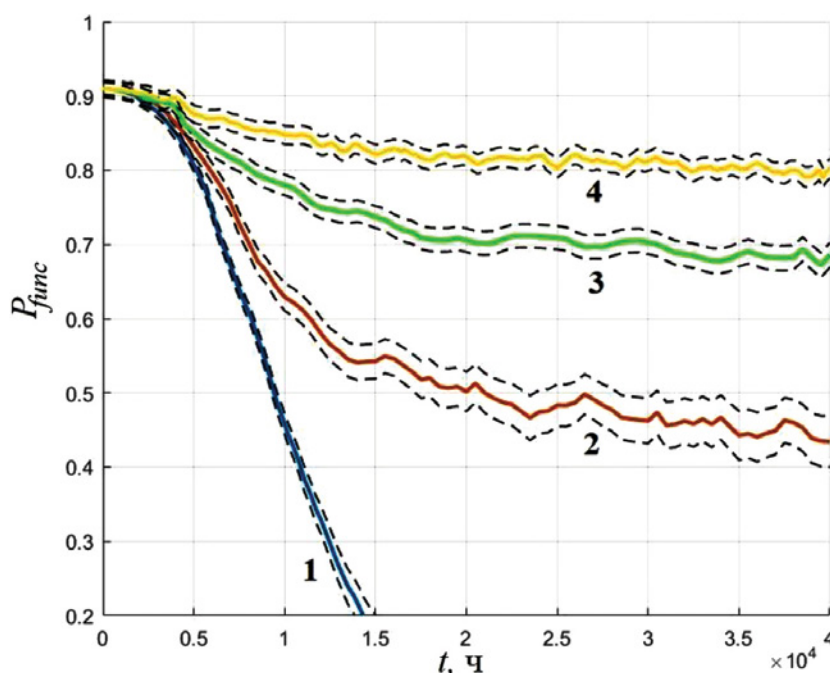


Рис. 2. Зависимость вероятности выполнения функции приема информации от наработки на отказ комплекса связи

1 – при отсутствии восстановления отказавших элементов, 2 – при среднем времени восстановлении за 4 месяца, 3 – при среднем времени восстановлении 2 месяца, 4 – при среднем времени восстановлении 1 месяца

нения данного отказа силами личного состава элемент отказывает до конца времени моделирования [3].

В данном примере рассмотрим более длинный временной промежуток – 5 лет, который является средним временем гарантийного обслуживания комплекса связи, т. е. если за этот период происходит отказ оборудования, то предприятие-изготовитель обязано устранить такой отказ [4].

Одним из эффективных способов уменьшения времени восстановления является предсказание времени наступления отказа. К примеру, предсказав отказ приемника за 50 ч с учетом коэффициента его использования 0,1, можно сократить время восстановления на 500 ч, заранее уведомив предприятие-изготовитель об опасном состоянии устройства. На рис. 2 представлены зависимости вероятности выполнения функции приема информации от наработки на отказ комплекса связи.

Из полученных результатов видно, что при уменьшении времени восстановления с четырех до двух месяцев увеличивается средняя вероятность выполнения функции приема ин-

формации с 0,45 до 0,68, или на 33%, а с 2 до 1 месяца – с 0,68 до 0,8, или еще на 15%. Данные результаты показывают важность увеличения скорости восстановления отказавших средств связи. Заложив этот параметр на этапе проектирования, можно заранее оценить надежность комплекса связи в течение длительного периода эксплуатации и при необходимости принять меры по повышению его надежности.

Прогнозирование отказов средств связи влияет на эффективность использования комплексов, способствуя минимизации простоев, оптимизации ресурсов и повышению устойчивости связи. Применение алгоритмов машинного обучения в задачах прогнозирования времени отказа в комплексах связи является новым подходом. Разработанные модели могут учиться на исторических данных о работе компонентов комплексов связи и на основе этой информации предсказывать время до возможного отказа, что позволяет операторам связи более точно планировать техническое обслуживание, замену компонентов и предотвращать возникновение аварийных ситуаций.

Использование алгоритмов машинного обучения позволяет анализировать данные о восстановлении после отказов и на основе этого оптимизировать процедуры и стратегии восстановления. Реализация такого подхода поможет операторам сократить время простоя и минимизировать проблемы, связанные с недоступностью или ненадежностью как отдельных элементов, так и корабельного комплекса связи в целом.

Разработка алгоритмов машинного обучения и их адаптация к специфическим задачам оценки надежности и ремонта средств связи являются новым направлением в исследованиях. В частности, использование различных методов, таких как регрессия, деревья решений, случайный лес или нейронные сети, для анализа и прогнозирования времени отказа и восстановления открывает новые возможности для оптимизации работы комплексов связи.

Таким образом, применение алгоритмов машинного обучения для прогнозирования времени отказа и сокращения среднего времени восстановления после отказов важны при эксплуатации корабельных автоматизированных комплексов связи ВМФ. Внедрение этих методов и подходов может значительно повысить надежность комплексов связи, обеспечив более эффективное планирование обслуживания и сокращение времени простоя.

ЛИТЕРАТУРА

1. Катанович А. А. и др. Интегрированный комплекс связи надводного корабля. – Патент РФ № 2548023 от 04.10.2025 г.
2. Катанович А. А. и др. Корабельный автоматизированный комплекс связи. – Патент РФ № 117052 от 10.06.2012 г.
3. Яшин А. И., Будко П. А., Винограденко А. М. Интеллектуальный контроль технического состояния морского робототехнического комплекса // Морская радиоэлектроника. – 2020. – № 1 (17). – С. 48–53.
4. Харченко А. В., Якимов В. Л. Метод обработки телеметрической информации в фазовом пространстве бортовых динамических систем космических аппаратов // Тр. Военно-космической академии им. А. Ф. Можайского. – 2019. – № 666. – С. 91–101. ■

В современных реалиях высокотехнологичного машиностроения и приборостроения ужесточение требований к точности готовой продукции сопровождается одновременным усложнением парка измерительного оборудования. Координатно-измерительные машины, многоканальные регистраторы, прецизионные датчики давления и температуры – все это звенья единой цепи, определяющей качество конечного изделия. Вместе с тем практика планирования калибровочных мероприятий исключительно на основе регламентных сроков сопряжена с двумя противоположными рисками: с одной стороны, неоправданными затратами при избыточной частоте проверок, с другой – потенциальным пропуском момента, когда прибор уже вышел из допуска, но формально еще считается годным.

Параллельно с этим в инженерной среде набирает обороты парадигма цифровых двойников. Под этим термином обычно понимают динамически обновляемую виртуальную копию физического объекта, поддерживающую с ним непрерывный информационный обмен. Если изначально данная технология применялась преимущественно на этапах проектирования, то теперь она уверенно проникает в эксплуатационную фазу, в том числе в сферу измерительных операций. Появляется возможность построения так называемого «метрологического двойника» – модели, которая отражает не только геометрию или конструктивные параметры прибора, но и его метрологические характеристики в режиме реального времени.

В связи с этим целью настоящей работы является разработка архитектурных решений и методических приемов, позволяющих реализовать автоматизированный контроль состояния средств измерений с использованием технологии цифровых двойников применительно к специфике серийного производства.

БАЗОВЫЕ ПРИНЦИПЫ ФОРМИРОВАНИЯ МЕТРОЛОГИЧЕСКОГО ЦИФРОВОГО ДВОЙНИКА

Прежде чем перейти к конкретной реализации, следует четко определить, что именно мы вкладываем в понятие цифрового двойника применительно к метрологическим задачам. В отличие от упрощенного понимания как трехмерной визуализации, в нашем случае это комплексная система, ядром которой выступает математическая модель, описывающая транс-

МЕТРОЛОГИЧЕСКИЙ ЦИФРОВОЙ ДВОЙНИК КАК ИНСТРУМЕНТ АВТОМАТИЗАЦИИ КОНТРОЛЯ СРЕДСТВ ИЗМЕРЕНИЙ В УСЛОВИЯХ СЕРИЙНОГО ВЫПУСКА ПРОДУКЦИИ

Е. А. Рылов, канд. техн. наук, ген. директор,

А. В. Долгов, гл. инженер,

К. В. Яшин, гл. технолог, АО «НПО «Завод «Волна»,
контакт. тел. (812) 244 5896

формацию погрешностей во времени с учетом внешних воздействий и режимов эксплуатации. В структуру *такого двойника*, согласно сложившейся практике, входят *три* обязательных компонента:

- реальный измерительный прибор или стенд;
- его виртуальный прототип, воспроизводящий поведение на уровне статистических и динамических характеристик;
- каналы обмена данными, обеспечивающие двунаправленную связь.

Отличие от традиционных подходов заключается именно в наличии обратной связи: аналитический блок не только считывает телеметрию, но и при необходимости инициирует изменение режима работы физического устройства либо выдает рекомендации оператору. В работах ряда авторов справедливо подчеркивается, что эффективность применения двойников напрямую коррелирует с достоверностью заложенных моделей погрешностей, которые, в свою очередь, должны строиться с учетом временной динамики и статистической структуры шумов. Для серийного производства, где номенклатура операций относительно стабильна, особенно перспективным представляется использование методов главных компонент и анализа временных рядов для обнаружения зарождающихся отклонений.

АРХИТЕКТУРА СИСТЕМЫ КОНТРОЛЯ НА БАЗЕ ЦИФРОВОГО ДВОЙНИКА

Опираясь на опубликованные в открытой печати результаты экспериментов, а также на собственный анализ требований к автоматизированным системам, предлагаем *четырёхуровневую структуру*, которая в наибольшей степени отвечает условиям непрерывного производственного цикла.

Первый, низший, уровень – физический. Он объединяет все имеющиеся на участке средства измерений, включая как стационарные, так и переносные образцы, а также эталонные меры и датчики внешней среды. Важной особенностью является необходимость унификации протоколов обмена, поскольку приборы разных производителей могут выдавать данные в различных форматах.

Второй уровень посвящен интеграции и предварительной очистке данных. На этом этапе выполняется фильтрация выбросов, интерполяция пропусков и компенсация систематических составляющих, например, с помощью фильтра Калмана. Именно здесь формируется тот массив, который в дальнейшем поступает в аналитический блок.

Третий, наиболее ответственный, уровень – аналитический. Здесь развёрнута сама цифровая модель каждого из контролируемых приборов. Для обработки многомерной информации целесообразно применять ансамблевые методы машинного обучения, такие как градиентный бустинг или случайный лес. Как показывают зарубежные публикации, подобные подходы позволяют достигать коэффициента детерминации на уровне 0,9 и выше при прогнозировании отклонений для координатно-измерительных машин.

Наконец, *четвертый уровень* – это интерфейс принятия решений. Его задача – трансформировать результаты прогноза в конкретные действия: выдачу предупреждения, автоматическую корректировку измерительных алгоритмов или формирование заявки на внеочередную поверку. Такой механизм переводит метрологическое обеспечение из реактивной в проактивную плоскость.

ПЕРЕХОД К КАЛИБРОВКЕ ПО ФАКТИЧЕСКОМУ СОСТОЯНИЮ

В условиях поточного производства одной из самых рутинных и од-

новременно дорогостоящих операций остается периодическая поверка многочисленного парка приборов. Цифровой двойник позволяет принципиально изменить эту практику. Идея заключается в том, чтобы заменить жесткие календарные интервалы на гибкое назначение калибровки по результатам непрерывного мониторинга.

Алгоритм действий в данном случае выглядит следующим образом: изначально в память модели загружаются паспортные данные, протоколы предыдущих проверок и информация об условиях эксплуатации. Затем, по мере накопления текущих измерений, двойник периодически сопоставляет их с эталонными значениями, которые могут поступать от встроенных контрольных мер или же из сравнительного анализа показаний параллельно работающих датчиков. На основе имитационных прогонов по методу Монте-Карло оценивается вероятность того, что в ближайшей перспективе погрешность превысит установленные пределы. Как только расчетный риск оказывается выше порогового значения, система автоматически инициирует процедуру поверки, причем делает это именно тогда, когда это действительно необходимо, а не по формальному графику.

Приведенные в литературе экономические оценки свидетельствуют, что подобный подход позволяет сократить затраты на калибровочные мероприятия примерно вдвое, одновременно снижая вероятность использования прибора с недопустимой погрешностью почти на 46%. Для массового выпуска продукции эти цифры выглядят крайне убедительно.

ВОПРОСЫ ДОСТОВЕРНОСТИ И НОРМАТИВНОЙ ПОДДЕРЖКИ

Разумеется, внедрение цифровых двойников в метрологическую практику неизбежно ставит вопрос о легитимности результатов, получае-

мых на основе виртуальных моделей. Чтобы избежать недоверия со стороны контролирующих органов и потребителей, необходимо предусмотреть ряд мер:

- во-первых, регулярное сопоставление прогнозов двойника с прямыми измерениями на эталонных установках для периодической валидации модели;
- во-вторых, разработку и утверждение методик аттестации самого цифрового двойника как средства, участвующего в формировании измерительной информации.

В отечественной нормативной базе уже имеются предпосылки для этого, в частности, ГОСТ Р 57700.37–2021 устанавливает общие требования к цифровым двойникам изделий. Предложенная в настоящей работе архитектура не противоречит положениям указанного стандарта и при надлежащем документировании может быть интегрирована в существующую систему управления качеством предприятия.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенный анализ позволяет утверждать, что технология цифровых двойников представляет не просто дань моде, а рабочий инструмент для повышения эффективности метрологического обеспечения серийного производства. Реализация описанной четырехуровневой структуры дает возможность объединить разрозненные потоки данных, прогнозировать изменение характеристик приборов с привлечением методов машинного обучения и на этой основе оптимизировать загрузку метрологической службы. Переход к калибровке по состоянию, встраивание контроля непосредственно в цифровой контур предприятия – всё это ведет к снижению издержек и росту стабильности качества.

В качестве направления для дальнейших исследований видится раз-

работка отраслевых руководящих материалов по валидации цифровых моделей средств измерений и адаптация предложенной архитектуры под специфику конкретных производственных участков. На данный момент АО «НПО Завод «Волна», реализует по данному алгоритму «Модульную автоматизированную систему тестирования» для изделия Р-225.

ЛИТЕРАТУРА

1. Прокопчина С. В., Звягин Л. С. Актуальные направления и перспективы развития прикладных информационно-измерительных систем//Динамика сложных систем – XXI век. – 2025. – Т. 19. – № 5. – 110–125.
2. Рябенко В. Ю. Анализ применения информационно-измерительной системы обнаружения дефектов в электронных блоках//Приборы и системы. – 2025. – № 5. – С. 32–37.
3. Баронова В. А., Романцова Н. В. Применение технологии цифрового двойника в информационно-измерительных системах//Изв. высших учебных заведений России. – Сер. Радиоэлектроника. – 2025. – Т. 28. – № 2. – С. 107116.
4. Супрунюк В. В., Кувыкин Ю. А. и др. Цифровой двойник как основа автоматизации метрологической службы//Вестник метролога. – 2024. – № 1.
5. Metrology and manufacturing-integrated digital twin (MM-DT) for advanced manufacturing: Insights from coordinate measuring machine (CMM) and FARO arm measurements//Science Direct. – 2025. – Vol. 2. – Iss. 2.
6. Логачев Р. На работу выходят двойники: Как цифровые двойники решают задачи метрологии//ProКачество. – 2025.
7. Проект ГОСТ Р (первая редакция). Компьютерные модели и моделирование. Метрологическое обеспечение. Общие положения.
8. AutoInspect: Inspection of complex objects – multisensory, modular, continuously digitized//Fraunhofer IOSB. – 2025.
9. Digital Twin Driven Quality Control in Smart Mobile Factories//Procedia CIRP. – 2025. – Vol. 134. – P. 801–806. ■

Системы на основе кремния и алюминия занимают ключевое место в современной микро- и нанoeлектронике, силовой электронике, а также в различных вариантах гибридной интеграции. При прямом контакте кремния с алюминием в технологически значимом диапазоне температур наблюдается интенсивная взаимная диффузия, приводящая к образованию интерметаллидных фаз, развитию пористости и деградации электрических и механических свойств соединения. На уровне приборных структур это выражается в росте сопротивления контактов, изменении конфигурации проводников, возникновении утечек и отказов. Одним из эффективных подходов к стабилизации интерфейса Si–Al является введение промежуточных металлических слоев, которые модифицируют диффузионные потоки, формируют барьерные фазы и перераспределяют напряжения на границе раздела. Цель работы – анализ роли таких слоев в управлении взаимной диффузией в системах Si–Al с позиций фазовой термодинамики, кинетики массопереноса и структурно-фазовых превращений.

Взаимная диффузия в системе Si–Al определяется особенностями диаграммы состояния Al–Si, характеризующейся ограниченной растворимостью компонентов в твердом состоянии и образованием интерметаллидных соединений. В диапазоне 350–550 °C, характерном для процессов микроэлектроники, алюминий остается пластичным, тогда как кремний сохраняет жесткую кристаллическую решетку [1]. На интерфейсе Si–Al диффузия идет преимущественно за счет перемещения атомов алюминия в кремний и в меньшей степени кремния в алюминий [2]. Основной механизм носит вакансионный характер: алюминий, обладая высокой концентрацией вакансий, внедряется в приповерхностные слои кремния, инициируя образование силицидоподобных и интерметаллидных фаз. Формирование этих фаз сопровождается изменением объема, возникновением локальных напряжений и развитием пористости, особенно при термоциклировании [3]. Дополнительное усложнение вносит эффект Киркендалла, связанный с неравенством потоков Al и Si и макроскопическим смещением интерфейса.

В технологии металлизации кремниевых структур исторически применялись различные барьерные и промежуточные слои на основе тугоплавких металлов и их соединений (Ti, TiN, W, Mo, Ta и др.) [4]. Эти слои предназна-

чены для подавления взаимной диффузии, уменьшения электромиграции и повышения адгезии. В контексте систем Si–Al промежуточные металлические слои могут выполнять функции пассивного диффузионного барьера, активного реакционного слоя с последующим образованием стабильного силицида, а также буферного слоя, компенсирующего термомеханические напряжения и формирующего проводящий интерфейс с контролируемой электронной структурой [5]. В отличие от диэлектрических прослоек они обеспечивают высокую электропроводность, что особенно важно для силовых и высокочастотных приборов, а также для трехмерной интеграции и высокотемпературных модулей.

Критерии выбора материалов промежуточных слоев определяются сочетанием фазовых, кинетических и механических факторов. Перспективны металлы, которые образуют с кремнием термодинамически стабильные, проводящие силициды с умеренной энтальпией образования, узким диапазоном гомогенности и совместимой с кремнием кристаллической структурой [6]. Такие силициды обеспечивают устойчивые характеристики интерфейса при длительных термообработках, выступая одновременно как низкоомный контакт и диффузионный барьер для алюминия. При этом необходимо избегать систем, в которых взаимодействие промежуточного металла с алюминием приводит к образованию хрупких интерметаллидов, склонных к растрескиванию и деламинации в рабочем температурном диапазоне. Таким образом, при выборе материала учитываются не только коэффициенты диффузии, но и модуль упругости, пластичность, коэффициент термического расширения и устойчивость к образованию дефектных быстрых диффузионных путей.

Влияние промежуточного металлического слоя на взаимную диффузию проявляется прежде всего в модификации путей массопереноса. В структуре без барьера доминирует диффузия по границам зерен и дефектам кристаллической решетки алюминия и припо-

верхностной области кремния [7]. При введении промежуточного слоя интерфейс усложняется, возникает дополнительная граница раздела, изменяется распределение дефектов и вакансий, формируются новые фазовые зоны. Если промежуточный слой переводится в силицидное состояние, фактический контакт Si–Al заменяется интерфейсом Si–силицид–Al, и диффузия алюминия в кремний ограничивается переносом через силицидный слой с принципиально иными, как правило меньшими, значениями коэффициента диффузии [8]. Это приводит к замедлению роста реакционной зоны и стабилизации геометрии контакта.

Барьерный эффект промежуточных слоев можно описывать в терминах эффективного коэффициента диффузии через слой и критической толщины, обеспечивающей заданный ресурс структуры. В одномерной аппроксимации плотности потока атомов через барьер обратно пропорциональна его толщине при фиксированном коэффициенте диффузии (D_{eff}). Однако в реальных структурах эффективный коэффициент зависит от текстуры, размера зерен, плотности дефектов и присутствия примесей [9]. В многослойных системах типа Si–силицид–нитрид–Al диффузионный фронт проходит через последовательность фаз с различной кинетикой, а время до прорыва барьера определяется самым слабым элементом, будь то зернограничная диффузия в определенном слое или образование непрерывной проводящей фазы по дефектам. При термодинамическом рассмотрении промежуточный слой перераспределяет химические потенциалы компонентов. Если свободная энергия силицидной фазы ниже, чем энергия системы при непосредственном контакте Al и Si, формирование прослойки переводит систему в более стабильное состояние и снижает движущую силу дальнейшего взаимодействия. Одновременно металл промежуточного слоя может экранировать кремний от кислорода и других примесей, снижая количество оксидных включений и центров порообразования на интерфейсе, что дополнительно стабилизирует структуру.

РОЛЬ ПРОМЕЖУТОЧНЫХ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ СЛОЕВ В УПРАВЛЕНИИ ВЗАИМНОЙ ДИФФУЗИЕЙ В СИСТЕМАХ Si–Al

А. И. Назмиев, аспирант,

Казанский национальный исследовательский университет им. А. Н. Туполева – Казанский авиационный институт,
контакт. тел. + 7 (919) 912 3747, albert.nazmiev@mail.ru

Экспериментальные исследования систем Si–промежуточный металл–Al основываются на контролируемом формировании многослойных образцов и детальном анализе их структурно-фазового и диффузионного состояния после различных режимов термообработки [10]. Обычно используют кремниевые подложки с заданным профилем легирования, подвергают их стандартной подготовке поверхности, затем наносят тонкие металлические слои методами магнетронного распыления, электронно-лучевого испарения или осаждения из плазмы. При необходимости предварительно проводят силицидирование (для Ti, Ni, Co и др.) с последующей стабилизирующей термообработкой. Алюминиевый верхний слой формируют в условиях, минимизирующих перемешивание на границах раздела. Кинетику взаимной диффузии и фазообразование изучают методами вторично-ионной масс-спектрометрии, Оже- и рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии с глубинным зондированием, а также электронной микроскопии с энергодисперсионным анализом [11]. Идентификация кристаллических фаз и оценка параметров решеток выполняются рентгеновской дифракцией. Изменения электрофизических характеристик оцениваются через измерения контактного сопротивления, температурного коэффициента сопротивления и стойкости к электромиграции.

Наиболее изученным классом промежуточных слоев являются силициды титана, никеля и кобальта. В структуре Si–TiSi₂–Al силицид формируют заранее, обеспечивая низкоомный контакт к кремнию и стабильный барьер для алюминия. В системах на основе NiSi и CoSi₂ благодаря сравнительно низкой температуре образования и хорошей совместимости с тонкими слоями удается реализовать эффективный барьер в субмикронных структурах [12]. Для пары «NiSi – Al» характерна меньшая склонность к взаимному растворению в широком диапазоне температур, чем для TiSi₂–Al, что связано с особенностями диаграмм состояния и меньшей тенденцией к образованию алюминидов переходного металла.

Другую группу составляют тугоплавкие металлы и их нитриды, такие как W, Mo, Ta, TiN, WN. Эти материалы обладают низкими коэффициентами диффузии для Al и Si и высокими температурами плавления [13]. Однако при повышенных температурах и в присутствии дефектов возможно формирование интерметаллидных фаз по границам зерен, что ухудшает барьерные свойства. Тонкие нитридные слои демонстрируют высокую термическую стабильность и хорошее по-

давление взаимной диффузии, но их проводимость ниже, чем у металлов и силицидов, что ограничивает применение в токонапряженных структурах. Увеличение толщины нитридных слоев часто сопровождается ростом внутренних напряжений и риском растрескивания.

Перспективным направлением является использование многослойных и композитных прослоек, в которых совмещаются адгезионные, реакционные, барьерные и буферные функции. Комбинации типа Ti/TiN/TiSi₂ или W/WN/силицид позволяют выстроить градиент по механическим и диффузионным свойствам, снизить чувствительность к локальным дефектам и обеспечить более длительное сохранение барьерного эффекта при общей толщине, сопоставимой с одинарным металлическим слоем. В таких системах характер распространения диффузионного фронта оказывается существенно более сложным, однако суммарное время до разрушения увеличивается за счет каскадного преодоления нескольких последовательно включенных препятствий для массопереноса.

Кинетическое моделирование диффузии в системах Si–промежуточный металл–Al обычно опирается на решения уравнений Фика в многослойной постановке, когда каждое покрытие представлено областью с собственным коэффициентом диффузии и конечной толщиной [14]. Граничные условия задают непрерывность потока и химического потенциала на интерфейсах. Для силицидных слоев учитывается рост реакционного слоя и возможный переход от режима, ограниченного скоростью химической реакции, к режиму, ограниченному диффузией. В последнем случае рост толщины силицида подчиняется параболическому закону, что позволяет по экспериментальным кривым толщина–время оценивать эффективный коэффициент диффузии. Для прогнозирования ресурса барьерных слоев широко используются аррениусовские зависимости, по которым экстраполируют время до начала заметной деградации при эксплуатационных температурах.

Введение промежуточных слоев существенно влияет на электрофизические и механические характеристики контактов. Изменение материала, непосредственно контактирующего с кремнием, приводит к модификации высоты потенциального барьера и распределения электрического поля на границе металл–полупроводник [15]. Силициды переходных металлов при достаточном легировании подложки обеспечивают формирование оми-

ческого контакта с низким удельным сопротивлением. Наличие барьерного слоя между алюминием и кремнием уменьшает влияние алюминия на легирование приповерхностной области и предотвращает неуправляемое перераспределение примесей, способное исказить параметры p–n-переходов. С механической точки зрения наличие прослойки влияет на распределение термомеханических напряжений, обусловленных различием коэффициентов термического расширения у кремния, силицида, промежуточных металлов и алюминия. Слишком жесткий и хрупкий барьер усиливает концентрацию напряжений и повышает риск трещинообразования, тогда как многослойная архитектура с градиентным изменением механических свойств позволяет реализовать более плавный переход от жесткого кристаллического кремния к пластичному алюминию и повысить долговечность соединения [16].

Перспективы развития в этой области связаны с разработкой нанокристаллических и аморфных металлических барьеров с управляемой структурой, в которых диффузионные свойства задаются конфигурацией иерархических дефектов, а также с использованием высокоэнтропийных сплавов, характеризующихся высокой энтропией смешения и существенной искаженностью решетки, что потенциально уменьшает коэффициенты диффузии. Существенное значение приобретает мультифизическое моделирование, сочетающее термодинамический расчет, молекулярно-динамические симуляции и методы континуальной механики для оптимизации состава и архитектуры промежуточного слоя под конкретные режимы эксплуатации.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Промежуточные металлические слои в системах Si–Al являются ключевым инструментом управления взаимной диффузией и, следовательно, надежностью и долговечностью электронной аппаратуры. Их действие основано на изменении путей массопереноса, термодинамической стабилизации интерфейса, формировании барьерных фаз и перераспределении термомеханических напряжений. Силицидные слои сочетают низкое контактное сопротивление с эффективным подавлением диффузии алюминия, тугоплавкие металлы и их нитриды обеспечивают высокотемпературную стабильность, а многослойные и композитные архитектуры позволяют оптимизировать весь комплекс электрических и механических свойств. Дальнейшее развитие методов наноинженерии, высокоточного анализа и мо-

делирования открывает возможности для целенаправленного проектирования новых поколений промежуточных металлических прослоек, обеспечивающих контролируемое протекание диффузионных процессов и высокую надежность контактов Si–Al в жестких эксплуатационных условиях.

ЛИТЕРАТУРА

1. Жилыков Д. Г., Горожанкина О. В., Федорова Е. Н., Юрьева В. А. Фазовые равновесия и структурообразование сплавов на основе алюминия и магния для авиационной промышленности: учеб. пособие. – Воронеж: ФГБОУ ВО «Воронежский гос. техн. ун-т», 2018. – С. 92.
2. Александров О. В., Криворучко А. А., Соболев Н. А. Моделирование диффузии алюминия в кремнии в инертной и окислительной средах. – Физика и техника полупроводников/Российская академия наук, Физико-технический институт им. А. Ф. Иоффе. – СПб., 2006. – Т. 40. – Вып. 4. – С. 385–390.
3. Шматов А. А. Методы термоциклической обработки для объемного упрочнения стальных инструментов//Международ. журнал прикладных и фундаментальных исследований. – 2021. – № 7. – С. 56–60.
4. Мидас Д. Б., Череных А. Г. Межсоединения элементов интегральных микро-

схем: учеб.-метод. пособие. – Минск: БГУИР, 2020. – 70 с.

5. Панин В. Е., Сергеев В. П., Моисеенко Д. Д., Почивалов Ю. И. Научные основы формирования теплозащитных и износостойких многослойных покрытий системы Si–al–N/Zr–y–o//Физ. мезомех. – 2011. – № 6. – С. 5–14.
6. Громов Д. Г. Материалы и процессы формирования многослойной металлизации кремниевых СБИС: дисс. ... д-ра техн. наук: 05.27.06. – М., 2000. – 271 с.
7. Попов А. А., Гриб С. В. Взаимная диффузия в двойных системах: учебно-методическое пособие по выполнению лабораторной работы по дисциплине «Физическое материаловедение». – Екатеринбург: ГОУ ВПО УГТУ–УПИ, 2006. – 23 с.
8. Слипченко Н. И. Моделирование диффузионных процессов при образовании слоев силицидов//Радиоэлектроника и информатика. – 1998. – № 2 (3). – С. 156–158.
9. Лобанов М. Л., Юровских А. С., Кардонина Н. И., Русаков Г. М. Методы исследования текстур в материалах: учеб.-метод. пособие. – Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2014. – 115 с.
10. Джес А. В. Модели наноструктурирования в композиционных системах Al–Ni, Cu–Sn, Fe–Mn–C, Ni–Ti при быстропротекающих твердофазных процессах в зонах локализации пластической деформации: дисс... канд. техн. наук:

05.16.06. – Красноярск, Сибир. федер. ун-т. – 2017. – 165 с.

11. Троян В. И., Пушкин М. А., Борман В. Д., Тронин В. Н. Физические основы методов исследования наноструктур и поверхности твердого тела/Под ред. В. Д. Бормана: учеб. пособие. – М.: МИФИ, 2008. – 260 с.
12. Бадаев А. С. Материалы и структуры микро- и наноэлектроники. Ч. 1. Проводниковые материалы: учеб. пособие. – Воронеж: ФГБОУ ВПО «Воронежский гос. техн. ун-т», 2015. – 155 с.
13. Денисова Э. И., Карташов В. В., Рычков В. Н. Тугоплавкие металлы и сплавы на их основе: учеб. пособие/М-во науки и высшего образования РФ, Уральский федеральный университет. – Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2025. – 224 с.
14. Русаков В. С., Кадыржанов К. К., Сухорук И. А., Жанкадамова А. М. Моделирование диффузии и фазообразования в слоистых бинарных металлических системах//РЭНСИТ. – 2011. – № 2. – С. 19–37.
15. Снитковский Ю. П. Изменение электрических свойств границы раздела «металл – полупроводник» под действием ионного облучения//Вестник ЮГУ. – 2018. – № 4 (51). – С. 1–16.
16. Синев Л. С. Оценка механических напряжений в соединенных при повышенной температуре кремнии и стекле//Машиностроение и компьютерные технологии. – 2014. – № 12. – С. 951–965. ■

Радиосвязь ОВЧ-диапазона от 30 до 300 МГц активно используется морской подвижной радиосвязью для организации управления и взаимодействия между судами в морских акваториях [1, 2]. Вместе с тем наличие радиогоризонта ограничивает дистанцию связи [3, 4]. Поэтому для ее увеличения целесообразно использовать составные радиoliniи, в частности, с применением беспилотных летательных аппаратов (БЛА) [5]. Очевидно, что чем выше будет высота подъема ретранслятора, тем на большее будет дистанция связи. Но поскольку на ретрансляторах, как правило, устанавливают ненаправленные антенны, то их применение существенно расширяет зону электромагнитной доступности абонентов, а учитывая все более возрастающую пиратскую деятельность отдельных организаций [6], то безосновное использование ретрансляторов на платформах БЛА ведет к повышению рисков захвата судов со стороны пиратов.

Следовательно, вопросы разработки научно-методического аппарата по обоснованному выбору параметров составной радиoliniи, в том числе с учетом высоты подъема БЛА, является актуальными для службы морской подвижной радиосвязи.

ОЦЕНКА ЗАТУХАНИЯ В СОСТАВНЫХ РАДИОЛИНИИХ МОРСКОЙ ПОДВИЖНОЙ РАДИОСВЯЗИ

Е. В. Демин, ст. преподаватель ВАС им. С. М. Будённого,
С. В. Дворников, д-р техн. наук, проф., ГУАП и ВАС им. С. М. Будённого,
Д. В. Васильева, зам. директора ГУАП,
контакт. тел. +7 (966) 922 7865, devlad74@yandex.ru, practicsv@yandex.ru,
wsvr@guap.ru

АНАЛИЗ ОСОБЕННОСТЕЙ ЗАТУХАНИЯ СИГНАЛОВ ОВЧ-ДИАПАЗОНА НА МОРСКИХ ТРАССАХ

Затухание сигналов ОВЧ-диапазона при организации радиосвязи между судами определяется двумя факторами [7, 8]. Во-первых, затуханием, обусловленным распространением радиоизлучений в свободном пространстве, и затуханием при распространении вдоль морской поверхности:

$$W = W_0 + W_{\Pi}, \quad (1)$$

Здесь W_0 – множитель ослабления, определяющий затухание в свободном пространстве; W_{Π} – множитель ослабления, связанный с распространением радиоволн вдоль водной поверхности.

Затухание сигнала изотропного излучателя в свободном пространстве определяется согласно формуле

$$W_0 = 1 / 4\pi r^2, \quad (2)$$

где r – радиус сферического распространения спектральной плотности мощности излучения.

Учитывая, что плотность потока мощности радиоизлучения описывается вектором Пойтинга, ее значение в точке приема будет определяться следующим выражением [9]:

$$\Pi = P_{\text{им}} / 4\pi r^2, \quad (3)$$

где $P_{\text{им}}$ – мощность радиоизлучения.

Помимо мощности излучения передающих средств на качество приема существенное влияние оказывают параметры приемной антенны. В частности, допустимое среднее значение спектраль-

ной плотности мощности в точке приема существенно зависит от коэффициента направленного действия приемной антенны $G_{\text{прм}}$ и чувствительности приемного устройства Y , которая определяется произведением уровня мощности, подводимой к входу, и эффективной площади приемной антенны [10, 11]. В свою очередь, эффективная площадь приемной антенны S_A рассчитывается в соответствии с формулой

$$S_A = G_{\text{прм}} \lambda^2 / 4\pi, \quad (4)$$

где $G_{\text{прм}}$ – коэффициент направленного действия приемной антенны; λ – длина волны.

Тогда результирующее значение, характеризующее спектральную плотность мощности с учетом значения S_A , будет равно

$$\begin{aligned} P_{\text{прм}} &= PS_A = \frac{P_{\text{им}} G_{\text{прд}}}{4\pi r^2} \frac{G_{\text{прм}} \lambda^2}{4\pi} = \\ &= P_{\text{им}} G_{\text{прм}} G_{\text{прд}} \left(\frac{\lambda}{4\pi r} \right)^2 = \\ &= \frac{300^2 P_{\text{им}} G_{\text{прм}} G_{\text{прд}}}{(4\pi r f)^2}. \end{aligned} \quad (5)$$

Здесь r – дистанция связи между передатчиком и приемником (протяженность радиолинии).

Следует отметить, что формула (5) отражает энергетический потенциал радиолинии при распространении радиоволны в свободном пространстве для условия высокоподнятых антенн.

Для низкоподнятых антенн энергетические потери радиоизлучений связаны в основном с их затуханием в подстилающей поверхности (водной акватории).

При этом в расчетах затухания помимо длины волны и дистанции связи используют значения эквивалентных эффективных высот антенн. В [12] результирующее выражение расчета уровня затухания для режима низкоподнятых антенн представлено в следующем виде:

$$\sqrt{W_{\text{п}}(r)} = \frac{2}{\left| \sin \left(\frac{2\rho l_c' l_{\text{пр}}'}{\lambda r} \right) \right|}, \quad (6)$$

где $l_c', l_{\text{пр}}'$ – эквивалентные эффективные высоты передающей и приемной антенн, которые определяются по следующей формуле:

$$l_{c, \text{пр}}' = \sqrt{l_{c, \text{пр}}^2 + l_0^2}. \quad (7)$$

Здесь $l_{c, \text{пр}}$ – высоты поднятия передающей и приемной антенн над поверхностью воды (земли); l_0 – минимальная эффективная высота поднятия антенны, которая зависит от длины волны и вида поляризации, определяемого диэлектрической проницаемостью и проводимостью водной поверхности (подстилающей поверхности при представлении в общем виде).

Величину l_0 можно рассчитать как

$$l_0^2 = \left(\frac{\lambda}{2\pi\zeta} \right)^2, \quad (8)$$

где ζ – параметр, определяемый видом поляризации [13].

При вертикальной поляризации

$$\zeta_{\text{в}}^2 = \sqrt{(\varepsilon - 1)^2 + (60\lambda\sigma)^2} (\varepsilon^2 + (60\lambda\sigma)^2)^{-1}, \quad (9)$$

при горизонтальной

$$\zeta_{\text{г}}^2 = \sqrt{(\varepsilon - 1)^2 + (60\lambda\sigma)^2}. \quad (10)$$

В (9) и (10) значения ε и σ обозначают диэлектрическую проницаемость и проводимость подстилающей поверхности, в рассматриваемом случае – водной поверхности.

В таблице приведены значения величин ε и σ для различных видов водной поверхности [14].

Таблица

Значения величин ε и σ для различных типов водной поверхности

Тип подстилающей поверхности	Значение ε	Значение $\sigma, \text{м}^2$
Пресная вода	80	10^{-3}
Морская вода	80	4

Для дальней зоны радиотрассы, когда $r > 18 \cdot l_c' \cdot l_{\text{пр}}' / \lambda$, угол ее наклона α по отношению к поверхности Земли $\alpha < \pi/9$, т.е. выполнимо условие $\sin \alpha \approx \alpha$.

Это позволяет упростить расчет затухания сигнала в дальней зоне в соответствии с формулой Введенского (6) [15]:

$$\sqrt{W_{\text{п}}(r)} \approx 2 \times \left| \frac{2\pi l_c' l_{\text{пр}}'}{\lambda r} \right|^{-1} = \frac{\lambda r}{4\pi l_c' l_{\text{пр}}'}. \quad (11)$$

Выражение (11) получено с учетом условия, что $\alpha < \pi/9$, т.е.

$$2\pi l_c' l_{\text{пр}}' / \lambda r < \pi/9. \quad (12)$$

Результирующее выражение для расчета величины затухания радиоизлучений на трассе поверхностного распространения радиоволн будет иметь следующий вид:

$$W_{\text{п}}(r) \approx \lambda^2 r^2 / 16\pi^2 (l_c')^2 (l_{\text{пр}}')^2. \quad (13)$$

В формуле (13) представлены эквивалентные эффективные высоты антенн l_c' и $l_{\text{пр}}'$, значения которых определяются в соответствии с формулой (7) Выражение (13) определено как модель оценки затухания сигналов на дальних трассах для низкоподнятых антенн.

АНАЛИЗ ОСОБЕННОСТЕЙ ЗАТУХАНИЯ СИГНАЛА В РАДИОЛИНИИХ НА ТРАССЕ

Общий вид выражения (13) известен, однако при его использовании, как правило, выбирают не эквивалентные эффективные высоты антенн, а их реальные значения, что не всегда допустимо. Это обусловлено тем, что для разных

значений рабочих частот одна и та же позиция антенны может соответствовать как режиму высокоподнятой, так и низкоподнятой антенны.

В [14] определены условия, определяющие выбор указанного режима.

Режим высокоподнятых антенн наступает, если

$$l_{c, \text{пр}} > 3l_0, \quad (14)$$

что позволяет сделать следующее допущение:

$$l_{c, \text{пр}}' \approx l_{c, \text{пр}}. \quad (15)$$

Тогда расчетное выражение для оценки уровня затухания сигнала в дальней зоне при поверхностном распространении радиоволн для высокоподнятых антенн будет иметь вид

$$W_{\text{п}}(r) \approx \lambda^2 r^2 / 16\pi^2 l_c'^2 l_{\text{пр}}'^2. \quad (16)$$

Условие выбора режима работы низкоподнятых антенн будет определяться при невыполнении условия (14). В этом случае полагают, что

$$l_{c, \text{пр}}' \approx l_0. \quad (17)$$

Расчетное выражение для затухания сигнала в дальней зоне при поверхностном распространении радиоволн в режиме низкоподнятых антенн будет иметь вид

$$W_{\text{п}}(r) \approx \lambda^2 r^2 / 16\pi^2 l_0^4. \quad (18)$$

Поскольку в выражении (19) величина затухания определяется значением минимальной эффективной высоты поднятия антенны [16], которая, в свою очередь, зависит от параметра вида поляризации ζ (см. формулу (8)), то необходимо исследовать ее зависимость от величин ε и σ согласно формул (9) и (10).

На рис. 1 и рис. 2 представлена зависимость параметра $\zeta(\lambda)$ от длины волны λ , соответственно, для вертикальной поляризации и горизонтальной для параметров ε и σ , определяемых в таблице (см. выше).

Согласно результатам анализа зависимости параметра вертикальной поляризации от длины волны можно сделать вывод, что для радиолиний, развернутых над водоемами с пресной водой, значение параметра фактически не меняется и равно $\zeta_{\text{в}}(\lambda) = 0,012$.

В то же время параметр $\zeta_{\text{в}}(\lambda)$ достаточно резко изменяется (уменьшается) в диапазоне частот от 300 до 75 МГц с $\zeta_{\text{в}}(\lambda) = 3,948 \cdot 10^{-3}$, до $\zeta_{\text{в}}(\lambda) = 1,038 \cdot 10^{-3}$. И достаточно устойчив в диапазоне от 75 до 30 МГц с $\zeta_{\text{в}}(\lambda) = 1,038 \cdot 10^{-3}$ до $\zeta_{\text{в}}(\lambda) = 4,164 \cdot 10^{-4}$.

Анализ полученных результатов, представленных на рис 2, позволяет сделать следующее заключение: для антенн с горизонтальной поляризацией параметр $\zeta_{\text{г}}(\lambda)$ фактически не зависит от длины волны (рабочей час-

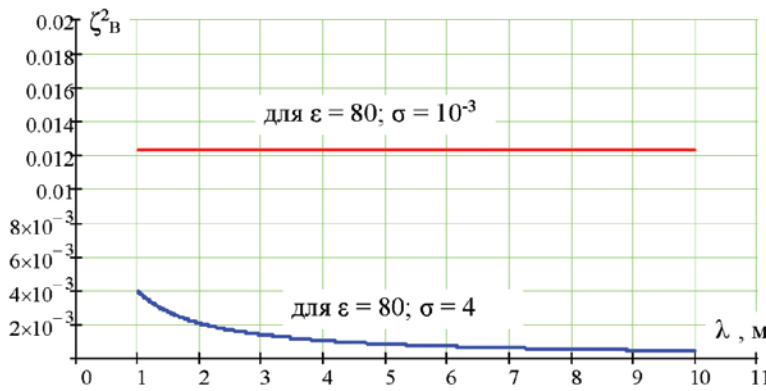


Рис. 1. Зависимость параметра вида вертикальной поляризации от длины волны

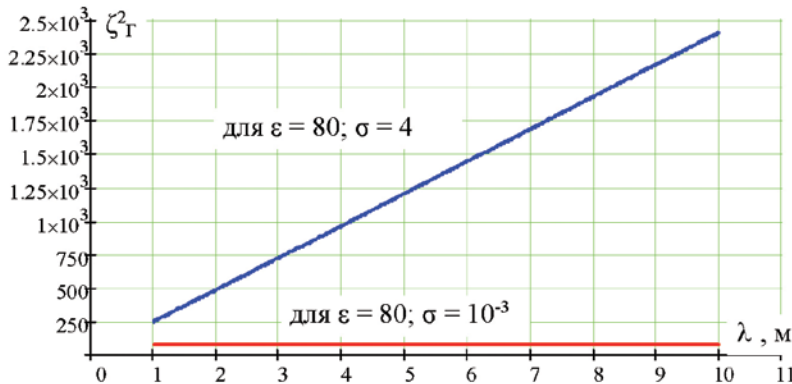


Рис. 2. Зависимость параметра вида горизонтальной поляризации от длины волны

тоты) для радиолиний, развернутых над поверхностью водоемов с пресной водой (практически на всех частотах $\zeta_r(\lambda) = 79$), и имеет ярко выраженную частотную зависимость для антенн, функционирующих над морскими акваториями с соленой водой (от $\zeta_r(\lambda) = 253$ на частоте 300 МГц до $\zeta_r(\lambda) = 2410$ на частоте 30 МГц).

Общий вывод состоит в том, что параметр поляризации является ярко зависимой функцией длины волны (частоты) для антенн, развернутых над морской поверхностью.

Поскольку в ретрансляторах предлагается использовать несимметричные вибраторы с вертикальной поляризацией [17], то в дальнейшем будем рассматривать только условия распространения радиоволн для антенн с вертикальной поляризацией.

Тогда формулу (8) можно привести к виду

$$I_0^2 = \lambda^2 \left(\frac{1}{2\pi\zeta_B(\lambda)} \right)^2, \quad (19)$$

где $\zeta_B(\lambda)$ – параметр, определяемый видом поляризации.

На рис. 3 представлена зависимость минимальной эффективной высоты поднятия антенны от длины волны в диапазоне от 30 до 300 МГц.

Анализ полученных результатов, представленных в виде графиков на рис. 3, показывает, что в диапазоне частот 30 до 300 МГц в морских акваториях

практически невозможно обеспечить режим высокоподнятых антенн, определяемый условием (14).

Следовательно, затухание сигнала на составных радиолиниях в морских

акваториях будет определяться выражением (18).

Тогда, подставляя выражение (18) в формулу (19), получаем

$$W_{\Pi}(r) \approx \frac{\lambda^2 r^2}{16\pi^2 \lambda^4 \left(\frac{1}{2\zeta_B(\lambda)} \right)^4} = \frac{\pi^2 r^2 \zeta_B(\lambda)^4}{\lambda^2}. \quad (20)$$

Далее, используя для расчета параметра вертикальной поляризации формулу (9), получаем результирующее выражение, позволяющее проводить расчет затухания сигнала в составных линиях над морскими поверхностями:

$$W_{\Pi}(r) \approx \frac{\pi^2 r^2 \zeta_B(\lambda)^4}{\lambda^2} = \frac{\pi^2 r^2 \times [(\epsilon - 1)^2 + (60\lambda\sigma)^2]}{\lambda^2 \times [\epsilon^2 + (60\lambda\sigma)^2]}. \quad (21)$$

На рис. 4 представлены графические зависимости расчета затухания сигналов на морских акваториях от дистанции связи для граничных значений рассматриваемого диапазона частот.

Для упрощения расчетов в районе верхней границы диапазона рекомендуется следующая эмпирическая формула:

$$W_{\Pi}(r)_{[дБ]} \approx 32,45 + 5 \lg(f)_{[МГц]} + 5 \lg(r)_{[км]}. \quad (22)$$

Следует отметить, что полученные значения затухания являются чисто теоретическими и на практике могут отличаться. В частности, при поднятии антенн над поверхностью при организации составных радиолиний, например, за счет использования ретрансляторов на беспилотных летательных платформах, потери будут уменьшаться за счет луч-

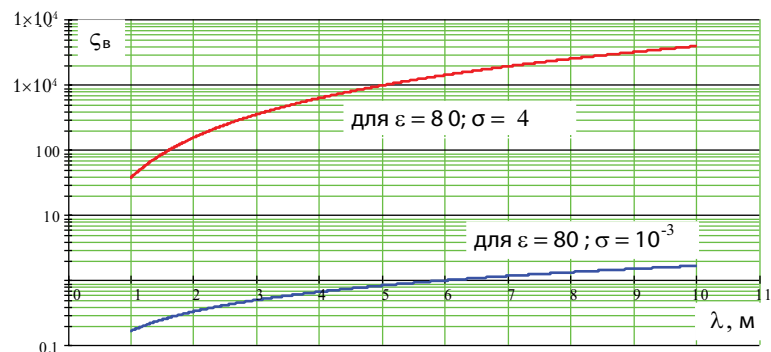


Рис. 3. Зависимость минимальной эффективной высоты поднятия антенны от длины волны в диапазоне от 30 до 300 МГц

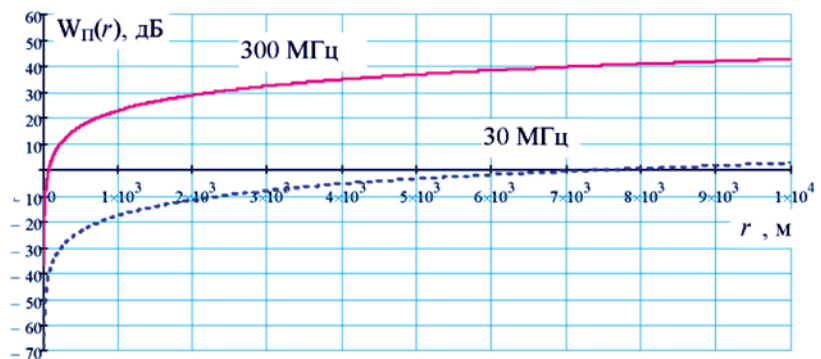


Рис. 4. Зависимость затухания сигналов на трассах морских акваторий от дистанции связи

шения условий прямой видимости. В то же время серьезное влияние на уровень затухания оказывают погодные условия. Туман, дождь и волнение существенно увеличивают потери. При этом летом затухание снижается за счет повышения рефракции. Кроме того, существенное влияние на затухание оказывают естественные и природные препятствия на трассах распространения радиоволн в виде отмелей, островов и кораблей.

К тому же теоретические расчеты не позволяют учесть интерференционные эффекты, вызванные волнением морской поверхности.

В результате реальные потери могут составлять на дистанции 10 км от 55 дБ при высокоподнятых антеннах, обеспечивающих прямую видимость в условиях летней рефракции, до 70 дБ, в так называемых неблагоприятных условиях при зимней рефракции и волнении моря, в условиях недостаточной прямой видимости. В то же время в режиме высокоподнятых антенн на дальности 10 км уровень затухания в свободном пространстве порядка 102 дБ.

На частотах 30 МГц практические измерения, представленные в [18], показали, что на уровень затухания сигналов значительное влияние оказывает ионосферное отражение (особенно ночью), обусловленное эффектом многолучевости. Поэтому реальные потери составляют 50–75 дБ. Для оценки уровня затухания в районе нижней части исследуемого диапазона рекомендовано следующее эмпирическое расчетное выражение:

$$W_{\text{п}}(r)_{[\text{дБ}]} \approx 20 + 10 \lg(f)_{[\text{МГц}]} + 15 \lg(r)_{[\text{км}]} \quad (23)$$

При этом затухания в свободном пространстве на частоте 30 МГц составят порядка 82 дБ.

Полученные результаты показывают, что при развертывании составных линий в морских акваториях важным фактором, определяющим уровень затухания, является интерференционная составляющая, обусловленная волнением. При этом, учитывая высокую проводимость соленой воды, целесообразно размещать ретрансляторы на высоте не выше 10–20 м, так как дальнейшее повышение высоты подъема приводит к режиму высокоподнятых антенн, при котором на частоте 300 МГц затухание возрастает от 30 до 50 дБ.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты проведенного исследования показали, что при организации составных линий морской подвижной радиосвязи в диапазоне ОВЧ необходимо по возможности использовать более низкие частоты. При этом необходимо понимать, что в указанном диапазоне распространение радиоволн

во многом ограничивается дальностью прямой видимости и при высоте подъема антенн на 20 м обеспечивает дальность до линии радиогоризонта порядка 17 мор. миль.

В проведенных расчетах не были учтены затухания, обусловленные волнением водной поверхности. В дальнейшем исследовании авторы рассмотрят возможность повышения достоверности связи в составных линиях за счет применения предложений по помехозащите, представленных в работах [19–21].

ЛИТЕРАТУРА

1. Плотников С. М., Исламов А. И., Ильмер Д. В., Шаповалов Ф. А. Оценка дальности УКВ радиосвязи береговых служб с подвижными морскими объектами в зависимости от длины антенно-фидерных трактов и высоты установки антенн над уровнем моря // *Техника средств связи*. – 2025. – № 3(171). – С. 2–14. – DOI 10.24412/2782-2141-2025-3-2-14. – EDN FQIDJE.
2. Шишкин А. В. Идентификация радиотелефонных передач в УКВ диапазоне морской радиосвязи // *Изв. вузов. Сер.: Радиоэлектроника*. – 2012. – № 11(605). – С. 11–20. – EDN SADTHR.
3. Работа линий радиосвязи с ППРЧ в условиях преднамеренных помех / *Вознюк М. А., Дворников С. В., Винокуров М. Е. и др.* // *Информационные технологии*. – 2012. – № 10. – С. 64–67. – EDN PDWUNB.
4. Киселев О. Н., Шарыгин Г. С., Крутиков М. В. Радиометеорологический атлас Мирового океана – основа для создания методики прогноза характеристик сигналов УКВ за радиогоризонтом // *Успехи современной радиоэлектроники*. – 2016. – № 11. – С. 68–73. – EDN XROVVX.
5. Дворников С. В., Падишин С. А., Ирза А. Н., Васильева Д. В. Предложения по оценке эффективности составных линий радиосвязи // *Вестник СПбУ гос. противопожарной службы МЧС России*. – 2025. – № 4. – С. 54–64. – DOI 10.61260/2218-130X-2025-4-54-64. – EDN TDMNVE.
6. Варламов С. Г. Формирование готовности у военных моряков к противодействию пиратам и террористам на море // *Морской сборник*. – 2014. – № 7(2008). – С. 58–63. – EDN SFIWHT.
7. Архипенко А. А., Корогодина И. В., Мосин Ю. В. К вопросу о мониторинге по электромагнитному фактору объектов подвижной радиосвязи // *Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии*. – 2019. – № 5(337). – С. 73–81. – EDN WJINWA.
8. Дворников С. В., Дворников С. С., Пишеничников А. В. Аппарат анализа частотного ресурса для режима псевдослучайной перестройки рабочей частоты // *Информационно-управляющие системы*. – 2019. – № 4(101). – С. 62–68. – DOI 10.31799/1684-8853-2019-4-62-68. – EDN VUYUFO.
9. Симонов А. Н., Волков Р. В., Дворников С. В. Основы построения и функционирования угломерных систем координатомет-

рии источников радиоизлучений: Учеб. пособие. – СПб.: Изд. ВАС. – 2017. – 248 с. – EDN: XRBXML.

10. Андреев Ю. А., Смирнов О. Б., Ковальчук С. С. Калибровка детектора для регистрации мощного СВЧ излучения // *Инфокоммуникационные и радиоэлектронные технологии*. – 2025. – Т. 8. – № 4. – С. 615–629.
11. Эмпирический подход к расчету зон покрытия цифровых телевизионных передатчиков / *С. В. Дворников, Г. Ю. Литкевич, П. Г. Романенко и др.* // *Вопросы радиоэлектроники*. – Сер.: *Техника телевидения*. – 2017. – № 3. – С. 70–75. – EDN ZTCABH.
12. Саяпин В. Н., Дворников С. В., Симонов А. Н., Волков Р. В. Метод пространственно-временной фильтрации радиосигналов на основе антенных решеток произвольной пространственной конфигурации // *Информация и космос*. – 2006. – № 3. – С. 83–89. – EDN KXAJOX.
13. Паньчев С. Н., Самоцвет Н. А. Методы определения действующей высоты и эффективной площади случайных антенн в широкой полосе частот // *Вестник Воронежского ГТУ*. – 2015. – Т. 11. – № 1. – С. 104–108. – EDN TNPYAX.
14. Долуханов М. П. Распространение радиоволн. – М.: Сов. радио. 1972. – 152 с.
15. Предложения по применению формулы Введенского для расчета затуханий радиолиний передачи видео / *Дворников С. В., Власенко В. И., Муравьев А. А., Дворников С. С., Котов А. А.* // *Вопросы радиоэлектроники*. – Сер.: *Техника телевидения*. – 2018. – Вып. 2. – С. 105–111. – EDN: USZLAY.
16. Оценка помехозащищенности линий радиосвязи в режиме с медленной программной перестройкой рабочей частоты / *Гордейчук А. Ю., Дворников С. В., Иванов В. А. и др.* // *Тр. учеб. заведений связи*. – 2017. – Т. 3. – № 4. – С. 36–42. – EDN VTQAXR.
17. Гайчук Ю. Н., Тамп Н. В., Ромахин В. А., Омельшин А. А. Оценка влияния сторонних объектов на диаграмму направленности четвертьволнового несимметричного вибратора // *Электромагнитные волны и электронные системы*. – 2023. – Т. 28. – № 3. – С. 11–17. – DOI 10.18127/j5604128-202303-02. – EDN DKZFIA.
18. Новейшие исследования распространения радиоволн вдоль земной поверхности / *сб. статей под ред. акад. Л. И. Мандельштама и акад. Н. Д. Папалекси*. – М.: ОГИЗ. 1945. – 296 с.
19. Дворников С. В., Дворников С. С., Манаенко С. С., Пишеничников А. В. Спектрально-эффективные сигналы с непрерывной фазой // *Вестник Воронежского ГТУ*. – 2016. – Т. 12. – № 2. – С. 87–93. – EDN VSUWCB.
20. Гужва А. Ю., Дворников С. В., Русин А. А., Пишеничников А. В. Методика трансформации сигнального созвездия сигнала КАМ-16 с изменением его формы // *Электросвязь*. – 2015. – № 2. – С. 28–31. – EDN TIRREJ.
21. Агиевич С. Н., Дворников С. В., Гусельников А. С. Описание сигналов в базисах функций сплайн Виленина–Кристенсона // *Контроль. Диагностика*. – 2009. – № 3. – С. 52–57. – EDN LAESRT. ■

АО «НТИ «Радиосвязь» является разработчиком антенны К-674–11Б, рассчитанной для работы в диапазоне частот 100–400 МГц и устанавливаемой на подвижных и стационарных объектах, например, судах и радиостанциях. Антенны, предназначенные для эксплуатации в указанных условиях, должны быть легкими, прочными, удобными для установки на судовых надстройках, противостоять обледенению и сильным ветрам, быть устойчивыми к качке и длительным наклонам, вибрации, ударам, обеспечивать молниезащиту, т. е. иметь непрерывность заземления по постоянному току. При этом диаграмма направленности такой антенны должна иметь максимум излучения в горизонтальной плоскости ввиду условий распространения волн данных диапазонов.

Антенна К-674–11Б представляет собой вертикальный симметричный вибратор, установленный на диэлектрических стойках с подведением питания по спирально проложенному коаксиальному кабелю. Должна устанавливаться на мачтах, реях надводных кораблей или мачтах радиостанций.

В настоящее время на судах и радиостанциях устанавливается радиостанция Р-620 с расширенным рабочим диапазоном частот от 100 до 512 МГц, что требует использования антенны с соответствующими параметрами.

Недостатком существующей антенны, разработанной для диапазона 100–400 МГц, является недопустимое изменение диаграммы направленности в вертикальной плоскости при соотношениях $l/\lambda_{\min} > 0,56$ (l – длина плеча антенны, $\lambda_{\min}$ – минимальная длина волны рабочего диапазона антенны) при кото-

рых отсутствует максимум излучения вдоль горизонта (рис. 1, диаграмма *a*), что приводит к нежелательному уменьшению коэффициента усиления (рис. 2, *a*). Эффект изменения диаграммы направленности в вертикальной плоскости усугубляется асимметрией плеч антенны из-за влияния спирального коаксиального кабеля питания, расположенного на диэлектрических стойках вдоль поверхности нижнего плеча вибратора. Такое расположение кабеля изменяет электрические параметры нижнего плеча вибратора за счет индуктивно-емкостной связи внешнего спирального проводника коаксиального фидера с цилиндрической поверхностью плеча вибратора.

С целью уменьшения значений коэффициента стоячей волны (КСВ) и коэффициента усиления (КУ) в рабочем диапазоне частот радиостанции Р-620 (100–512 МГц) и уменьшения вертикальных размеров вибратора с исключением асимметрии плеч были разработаны новые исполнения изделия К-674–11Б.

В основу разработки было положено техническое решение по созданию вертикального симметричного вибратора

с шунтом и спиральным коаксиальным фидером. Поставленная цель достигается тем, что в вертикальном симметричном вибраторе с шунтом и спиральным коаксиальным кабелем последний уложен по диэлектрическим стойкам вдоль нижнего плеча антенны с шагом меньше диаметра спирали, а плечо вибратора установлено на изоляторах, образованных продолжением стоек, при этом длина изоляционной части стоек $l_{\text{из}}$ определяется соотношением $l_{\text{из}}/\lambda_{\max} \geq 0,1$, проводники, образующие плечи антенны, выполненные в виде буквы Г, установленные под углом 65° к горизонтальной поверхности фланцев и повернутые Г-образной частью к их вертикальной оси, образуют укороченную биконическую Г-образную форму, при этом часть кабеля питания проложена внутри конической полости нижнего плеча, а его спиральная часть размещена на изоляционных стойках ниже торца этого плеча. Прокладка фидера питания внутри конической полости нижнего плеча вибратора и размещение его спиральной части на изоляционных стойках (изоляторах) ниже торца плеча вибратора приводят к тому, что он не шунтируется индуктивно-емкостной связью

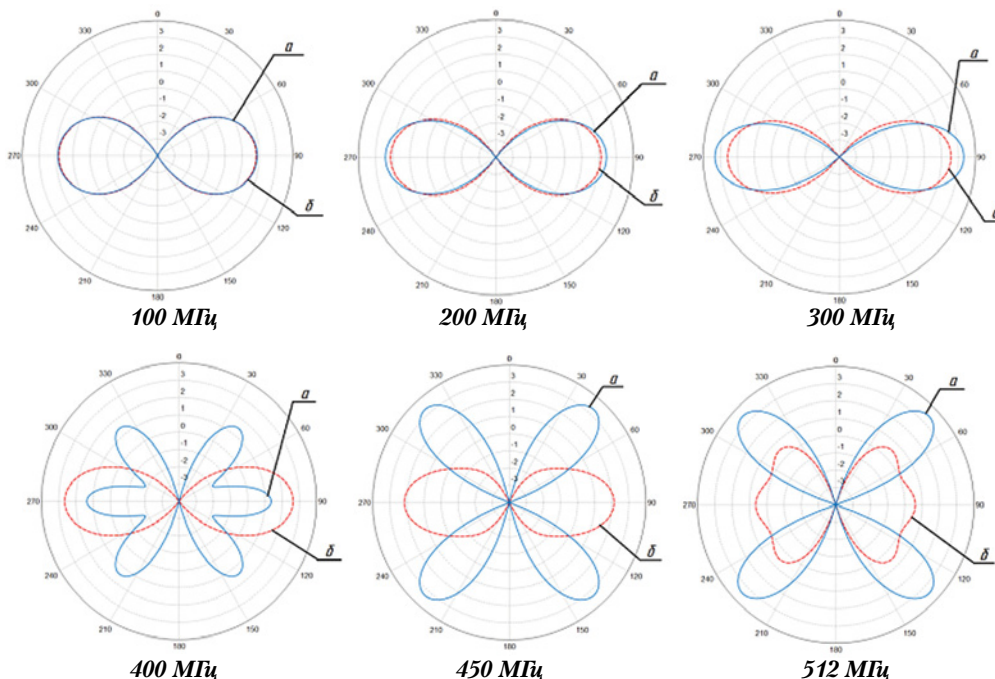


Рис. 1. Диаграммы направленности: *a* – исходная антенна, *б* – исполнение разработанной антенны

РАСШИРЕНИЕ ЧАСТОТНОГО ДИАПАЗОНА УКВ АНТЕННЫ К-674-11Б ДЛЯ НАДВОДНЫХ КОРАБЛЕЙ И РАДИОЦЕНТРОВ

А. Ю. Степкин, начальник отдела АФУ,
В. О. Миротворский, гл. специалист отдела АФУ,
АО «НТИ «Радиосвязь»,
контакт. тел. (812) 305 2520, 305 2528

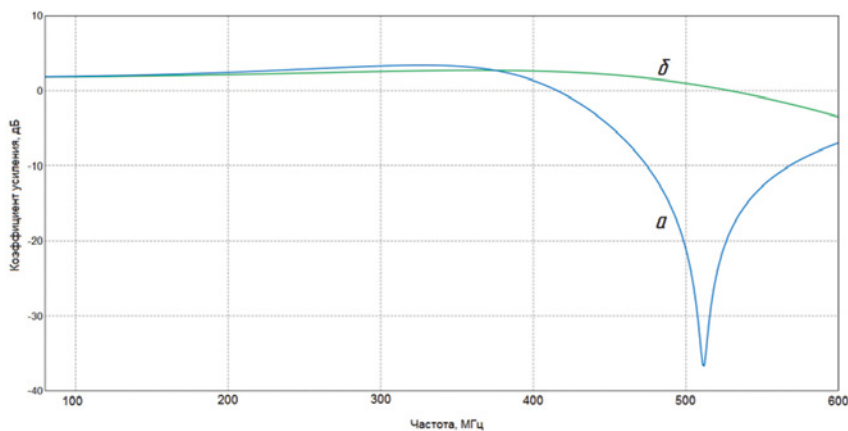


Рис. 2. Коэффициент усиления в горизонтальной плоскости: *а* – исходная антенна; *б* – исполнение разработанной антенны

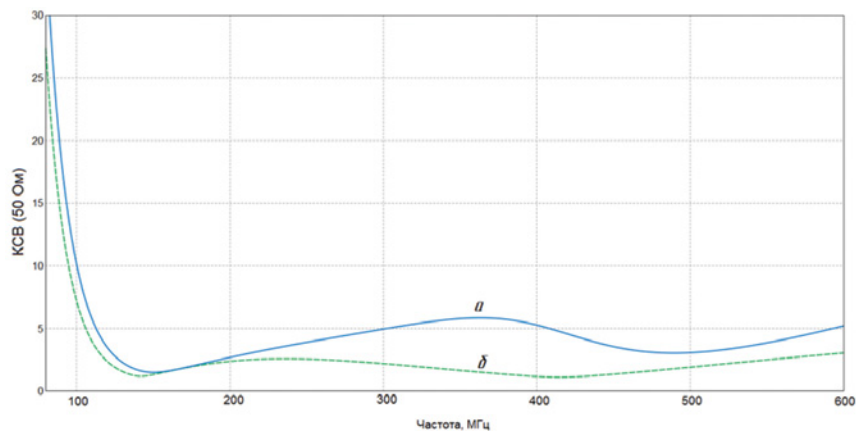


Рис. 3. Сравнение КСВ: *а* – исходная антенна, *б* – исполнение разработанной антенны

спираль-вибратор и, тем самым, исключается асимметрия верхнего и нижнего плеч, что позволяет сохранить форму диаграммы направленности в вертикальной плоскости. Также изменение цилиндрической формы плеч вибратора на укороченную биконическую Г-образную обеспечивает мало изменяющееся распределение тока в рабочем диапазоне частот, приводящее к сохранению максимума излучения вдоль горизонта (см. рис. 1, б).

На рис. 1 (диаграмма *а*) показаны диаграммы направленности вертикального симметричного вибратора с цилиндрическими плечами, а на рис. 1 – диаграммы направленности нового исполнения (диаграмма *б*) – вертикального симметричного укороченного биконического Г-образного вибратора с шунтом. Как следует из рис. 1, диаграммы направленности нового исполнения имеют максимум излучения вдоль горизонта до частоты 512 МГц (граница рабочего диапазона частот радиостанции Р-620).

На рис. 2 (кривая *а*) показан КУ антенны с цилиндрическими вибраторами и КУ разработанного исполнения с расширенным диапазоном частот рис. 2 (кривая *б*). Из сопоставления кривых *а* и *б* следует, что новое исполнение антенны обеспечивает более высокие значения коэффициента усиления в заданном диапазоне частот в горизонтальной плоскости.

На рис. 3 приведены значения КСВ в кабеле питания с волновым сопротивлением 50 Ом исходная антенна (кривая *а*) и новое исполнение (кривая *б*).

Общий вид конструкции исходной антенны К-674-11Б и разработанного изделия представлены на рис. 4.

Из рассмотрения параметров исходной антенны и разработанной антенны с расширенным частотным диапазоном очевиден положительный эффект, что подтверждается сопоставлением КУ и КСВ старой и новой антенн. Кроме того, за счет Г-образной формы плеча биконического вибратора удается уменьшить его вертикальный размер в 1,2 раза.

а)



б)



Рис. 4. Общий вид антенн: *а* – исходная антенна; *б* – исполнение разработанной антенны

ЛИТЕРАТУРА

1. Патент РФ № 202880 на полезную модель «Вертикальный симметричный вибратор с шунтом и спиральным коаксиальным фидером» от 11.08.2021 г. Миротворский О.Б., Степкин А.Ю., Миротворский В.О. ■

Селективное струйное электроосаждение было разработано Флетчером и Оливером в 1972 г. [4]. Этот метод был предложен для быстрой гальванизации определенных участков деталей, а затем получил дальнейшее развитие под названием «высокоскоростное селективное струйное электроосаждение» (High Speed Selective Jet Electroplating – HSSJE) для изготовления металлизированных микроэлементов [3, 6]. В HSSJE струя электролита ударяется о поверхность катода (заготовки) для достижения осаждения на заготовке [3]. Струя электролита создается выбросом электролита под высоким давлением из отверстия сопла. Между соплом и рабочей поверхностью оставляют зазор 1–5 мм. Между анодом и катодом сохраняется разность потенциалов, что приводит к протеканию тока через струю электролита. Плотность тока поддерживается от 13,26 до 56,8 мА/мм² [3].

Электролит высокой проводимости с ионами осаждающего материала используется для получения высокой проводимости и осаждения. Относительное движение между рабочей поверхностью и струей поддерживается по определенной схеме с помощью компьютерной системы управления движением для металлизации детали путем послойного осаждения [3]. Процесс HSSJE использовался для изготовления микроформ для микроэрозионной обработки и микродеталей.

Математическая модель и численный алгоритм были разработаны Ли и Уолкером [7] для прогнозирования скорости электроосаждения из двумерной струи электролита, падающей на плоскую поверхность. Предлагаемая модель не учитывала влияние изменения границы отложений. Разработанная модель подходила только для условий, в которых значения тока значительно ниже его предельного уровня. В дальнейшем двумерная модель была разработана Козаком и др. [5] для представления процесса электрохимической струйной обработки. В модели учитывалось влияние движущейся анодной границы (изменение границы из-за механической обработки). Основным направлением разработанной модели было определение скорости съема материала, скорости струи электролита при заданном входном напряжении и межэлектродном зазоре. Разработанная модель пригодна только для режимов обработки, основанных на электрохимическом механизме. Алкир и Чен [2] исследовали высокоскоростное гальванопокрытие с круговыми струями электролита, чтобы выполнить общие условия селективного высокоскорост-

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ВЫСОКОСКОРОСТНОГО ЭЛЕКТРООСАЖДЕНИЯ

Ф.А. Бараковский, ст. преподаватель,
Московский авиационный институт (Национальный исследовательский университет),
контакт. тел. (499) 158 4648

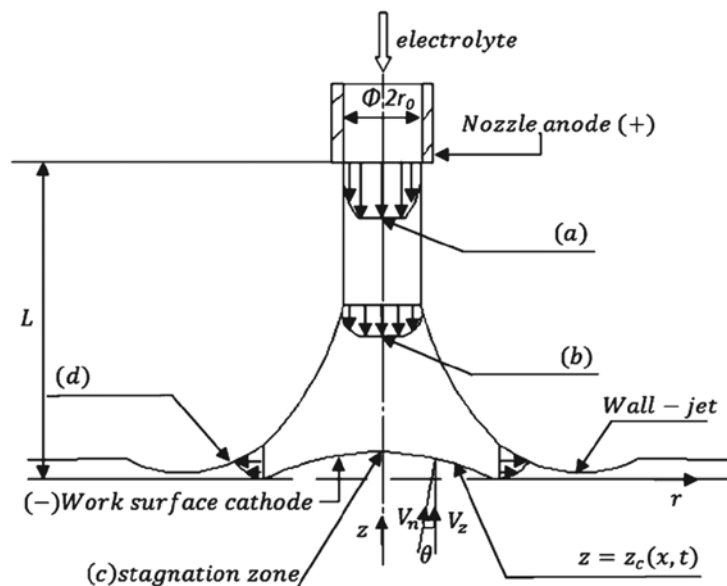


Рис. 1. Схема процесса струйной металлизации

ного гальванопокрытия. Они получили медное покрытие, используя подкисленный раствор сульфата. Исследователи также разработали математическую модель для исследования распределения тока и потенциала на поверхности подложки. предложенная модель также не учитывала влияние изменения границы осаждения в процессе.

Расположение сопла, струи электролита, рабочей поверхности и положение различных зон в математической модели HSSJE показано на рис. 1. Воздействие струи несжимаемой жидкости, выходящей из сопла, на поверхность струи можно разделить на четыре зоны: центральную (a), зону свободного потока (b), зону застоя (c) и зону радиального потока (d).

Описываемая модель является доработкой стандартной математической модели HSSJE, учитывающей изменение границ катодной плоскости при осаждении на ней меди в каждый промежуток времени Δt [8]. Эта модель представляется наиболее проработанной на данный момент в отношении описания процесса струйной металлизации.

В последнее время появляется все больше исследований с применением струйного метода металлизации, однако практически все публикуемые исследования направлены на никелирование одиночных образцов.

Доработанная модель показала хорошую сходимость с данными экспериментов (до 10,11%), однако в модели введены коэффициенты C_h и k_d , которые подбираются отдельно для определенных условий эксперимента. Их введение обусловлено, по предположению авторов, влиянием гидродинамических режимов в процессе струйного электроосаждения.

Однако исследованиями выявлено, что плотность тока, от которой напрямую зависит скорость электроосаждения меди, уменьшается по удалении от центра оси струи, падающей на деталь (рис. 2).

Это также согласуется с экспериментальными данными исследования [8], где градиент потенциала на катодной поверхности распределяется таким же образом (рис. 3).

Это распределение приводит к тому, что металл на заготовке осаждается неравномерно, а по оси соударения струи с катодной плоскостью ток может достигнуть критических значений и повлиять на качество металлизации.

Цель настоящей работы – объяснить влияние гидродинамических режимов на протекание процесса HSSJE и дополнить модель процесса, чтобы понять, как можно избежать неравномерного распределения плотности тока на катодной поверхности.

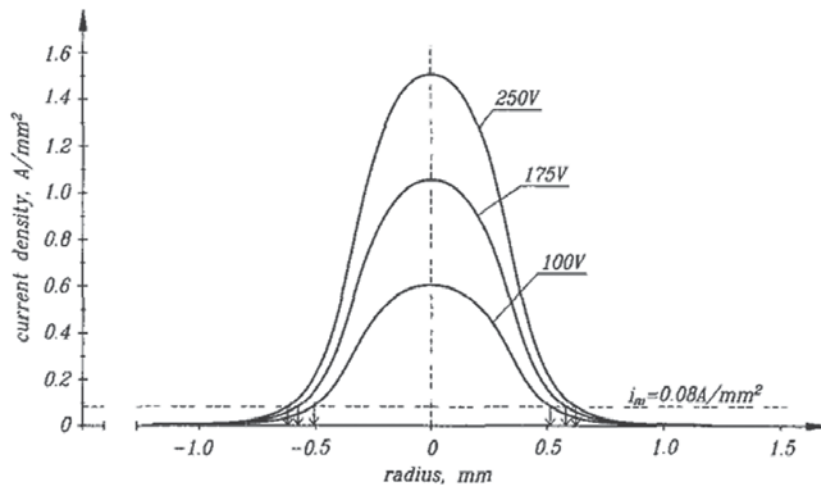


Рис. 2. Распределение плотности тока на анодной поверхности при разной разности потенциалов между анодом и катодом

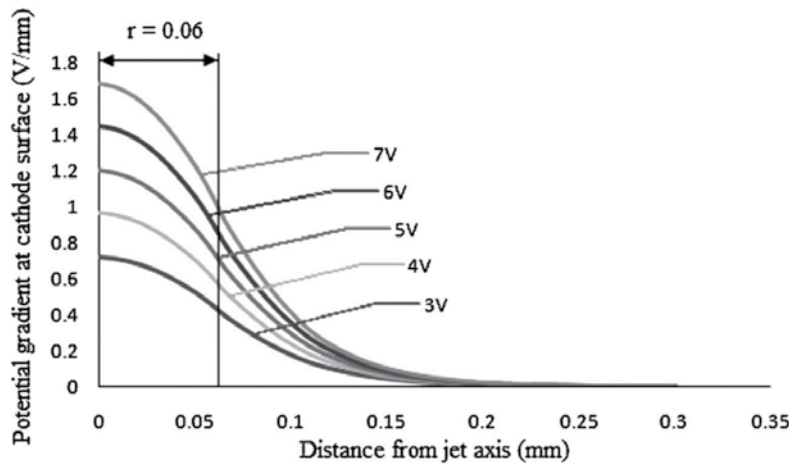


Рис. 3. Распределение градиента потенциала на катодной поверхности при различном потенциале анода

Приведенный выше обзор литературы показывает, что было предпринято очень мало попыток [7, 5, 2] моделирования процесса струйного электроосаждения. По-видимому, не предпринимаются попытки моделировать процесс струйного электроосаждения для более толстых покрытий в случае изготовления микродеталей с использованием движущейся катодной границы, не говоря уже о металлизации печатных плат, включая металлизацию отверстий.

Доработанная модель [8] позволяет прогнозировать скорость и высоту осаждения. Разработанный профиль электроосаждения можно в дальнейшем использовать для расчета ее скорости. Прогнозируемое значение скоростей отложений и их тенденции были подтверждены экспериментально. Установлено, что разработанная модель хорошо согласуется с полученными в ходе эксперимента данными, однако она не учитывает неравномерность осаждения меди по удалению от центра потока электролита.

Настоящее исследование сосредоточено на развитии модели процесса струйного электроосаждения в процессе металлизации печатных плат с учетом влияния гидродинамических

режимов на результат металлизации. Исследователи выдвигают гипотезу, что именно влияние этих режимов обуславливает неравномерность осаждения меди.

МОДЕЛИРОВАНИЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ПРОФИЛЯ СКОРОСТЕЙ В ПОТОКЕ ЭЛЕКТРОЛИТА

На выходе из насадка (рис. 4, начальное сечение 1-1) эпюра скорости прямоугольная и скорость истечения во всех точках одинакова и равна u_0 . Далее от сечения 1-1 до сечения 3-3 в пределах треугольника abc скорость течения также будет соответствовать значению u_0 . Этот участок течения называется начальным и имеет длину L . На линиях OM и OM' скорости равны нулю, точка O называется полюсом струи.

После сечения 3-3 начинается основной участок струи. На нем скорость движения жидкости непрерывно убывает вдоль сечения по удалению от центра потока от значения u_0 до нуля.

Исследования струйных течений, проведенные Т.Н. Абрамовичем [1], позволили определить основные параметры круглой струи (см. ниже), а также формулы для их определения.

Сначала определим, какому участку движения жидкости будет соответствовать струя, выходящая из сопла исследуемой установки. Расстояние между соплом и печатной платой x всегда одинаково и составляет 0,03 м; радиус сопла r_0 равен $d/2 = 0,0005$ м. Расстояние от сопла до полюса потока в таком случае

$$l_0 = \frac{0,29r_0}{a} = 0,001812 \text{ м.} \quad (1)$$

Суммарная длина потока

$$L_{\text{сум}} = x + l_0 \approx 0,032. \quad (2)$$

Данное расстояние превышает длину начального участка:

$$L = \frac{0,67r_0}{a} = 0,0042 \text{ м.} \quad (3)$$

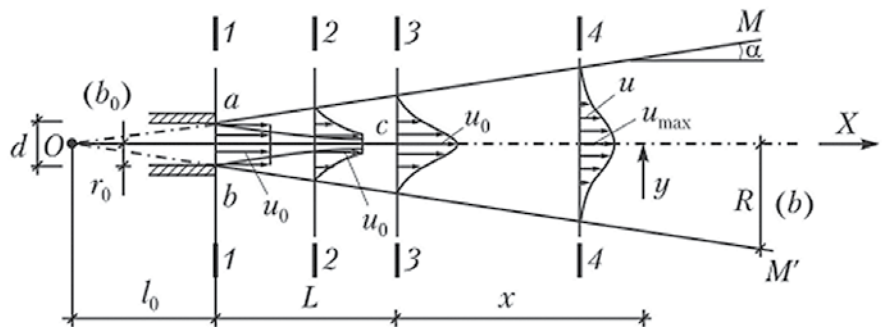


Рис. 4. Схема свободной струи, вытущенной из насадка

Расчетные соотношения для струи круглого сечения

Параметр	Значения параметров или расчетная формула
Коэффициент турбулентной структуры a	0,08
Половина угла расширения струи α	$3,4a$
Расстояние от полюса до начального сечения l_0	$0,29r_0/a$
Длина начального участка L	$0,67r_0/a$
Радиус R или полутолщина b струи	$(3,4ax/r_0 + 1)r_0$
Скорость на оси основного участка струи u_{max}	$\frac{0,96u_0}{ax/r_0 + 0,29}$
Расход на основном участке струи	$2,2Q_0(ax/r_0 + 0,29)$

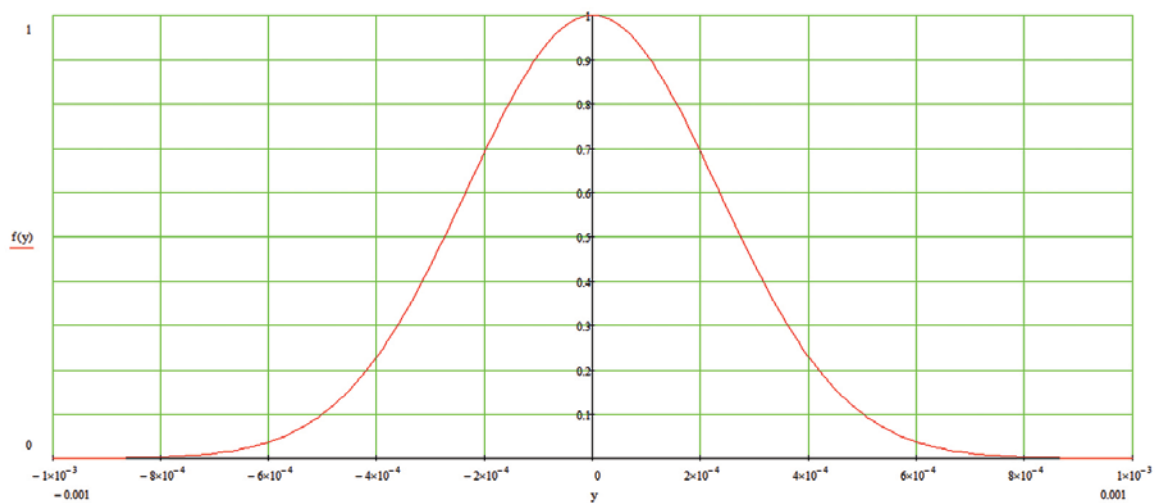


Рис. 5. Распределение профиля скоростей в сечении струи при соударении с плоской ПП

$f(y)$ – функция зависимости распределения профиля скоростей (5), y – расстояние от центра сечения потока электролита

Исходя из этого, соударение струи электролита с печатной платой (ПП) будет проходить в основной зоне потока, где распределение жидкости неравномерно.

Радиус сечения потока при соударении с ПП

$$R = r_0 \left(3,4 \cdot \frac{ax}{r_0} + 1 \right) = 0,00866 \text{ м.} \quad (4)$$

Далее для получения модели распределения профиля скоростей жидкости при соударении с профилем ПП предлагается использовать функцию нормального распределения, приведенную в работе Г. Н. Абрамовича «Теория турбулентных струй» [1]:

$$f(y) = e^{-\beta \left(\frac{y}{2R} \right)^2}, \quad (5)$$

где $\beta = 9,2$.

В результате получена зависимость распределения профиля скоростей вертикального потока жидкости, соударяемого с поверхностью ПП (рис. 5).

Далее характер этого распределения будем сравнивать с распределением толщины металлизации по поверхности печатной платы.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА СТРУЙНОГО ЭЛЕКТРООСАЖДЕНИЯ С УЧЕТОМ ГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ РЕЖИМОВ НА ОСНОВЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ

Во введении при описании модели струйного электроосаждения указано,

что модель не учитывает неоднородность роста катодной границы вследствие гидродинамического режима, характерного для металлизации струйным методом.

Выдвинута гипотеза, что неравномерность электроосаждения может быть объяснена распределением профиля скоростей потока электролита при соударении с металлируемой деталью. Для подтверждения гипотезы проведен эксперимент, в котором детали металлизировались в одной точке 30, 45 и 60 минут, после чего были проведены замеры толщины металлизации в точках по удалению от центра потока электролита.

Параметры детали, использующейся в эксперименте:

- радиус сечения потока – 0,5 мм;
 - материал покрытия – фольгированный стеклотекстолит.
- Параметры процесса металлизации:
- ток металлизации – 0,03 А;
 - время металлизации – 30, 45, 60 минут;
 - скорость потока электролита – 2,2 м/с;
 - скорость движения заготовки – 0,01 м/с.

Внешний вид деталей после металлизации представлен на рис. 6.

Толщины фиксировались с помощью компьютерной томографии (КТ)

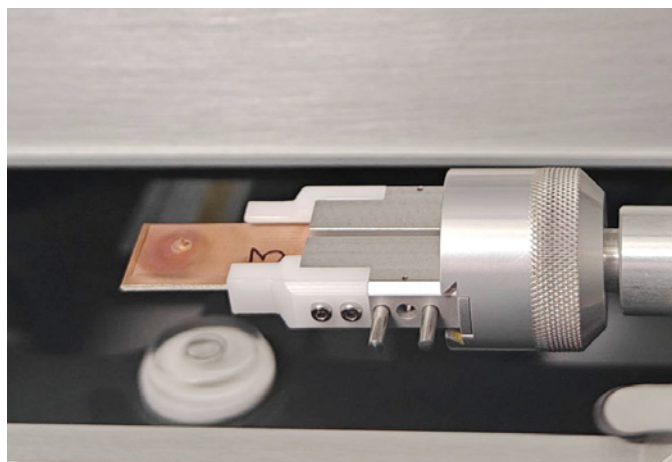


Рис. 7. Образец для анализа с помощью КТ



Рис. 6. Внешний вид образцов после металлизации

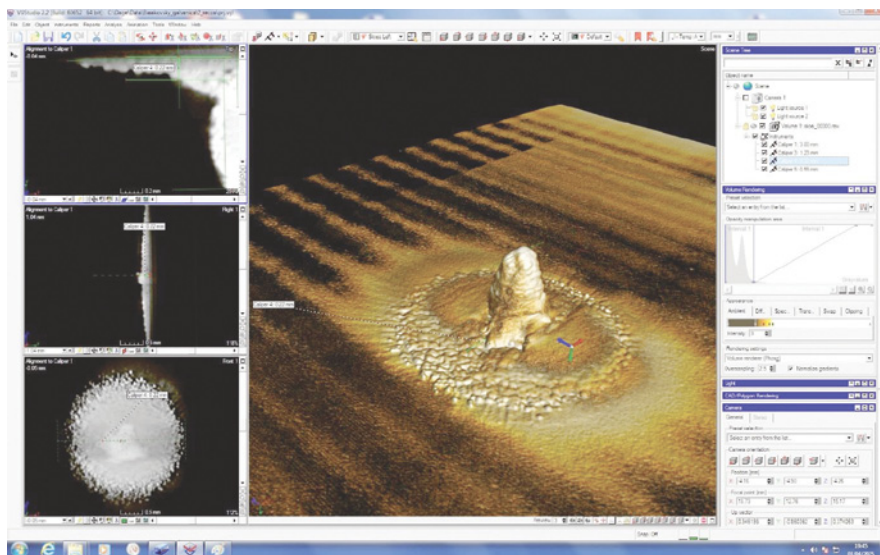


Рис. 8. Исследование толщины металлизации в ПО VGStudio

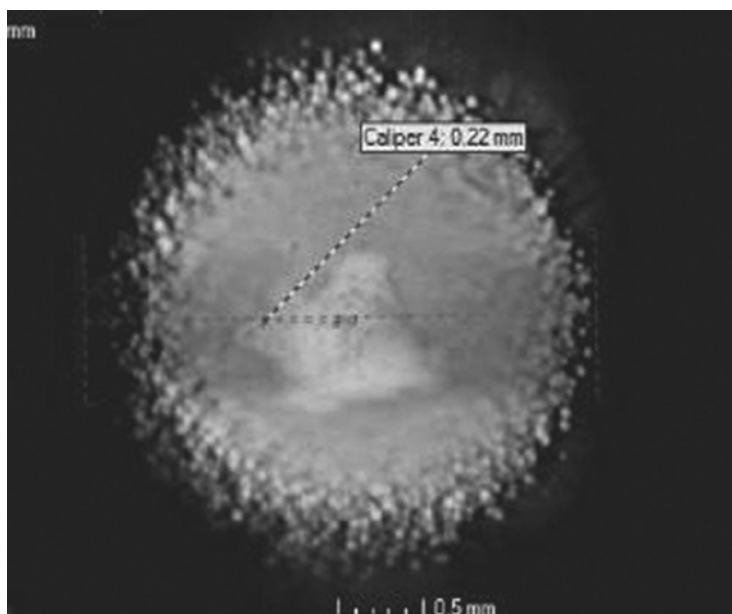


Рис. 9. Условная граница металлизации

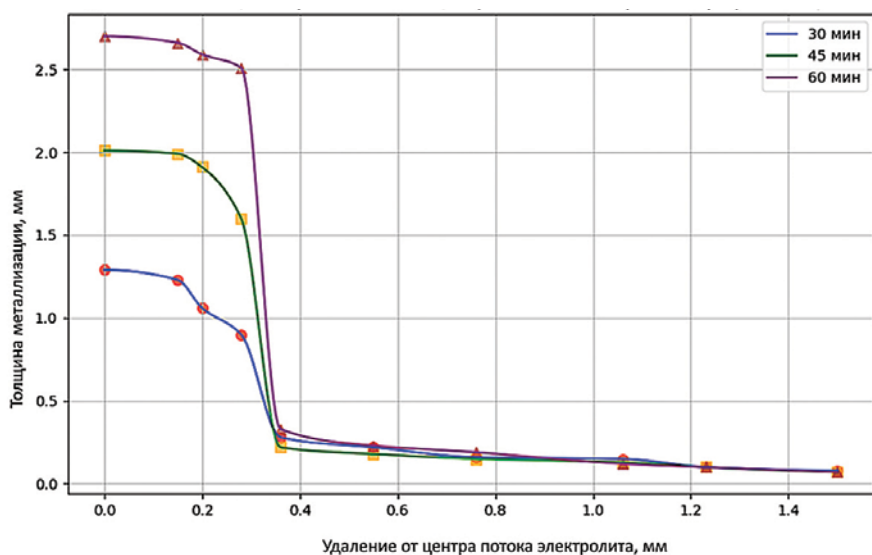


Рис. 10. Зависимость толщины металлизации от расстояния от центра потока электролита при разном времени металлизации

на системе рентгеновского контроля DAGE X-Plane в каждом образце по десяти точкам от центра потока и до условной границы металлизации, выявленной эмпирически (рис. 7). Получены зависимости толщины металлизации при разном времени металлизации в зависимости от удаления от центра потока (рис. 8, рис. 9).

После сбора данных, получены следующие результаты (рис. 10):

Сравнив разности значений графиков, можно допустить, что рост металлизации от времени линейный (рис. 11).

Для аппроксимации этой зависимости выбрана функция зависимости распределения профиля скоростей (5):

$$f(y) = Ae^{-\beta\left(\frac{y}{R}\right)^2}, \quad (6)$$

где R – радиус сопла, A – коэффициент, зависящий от времени металлизации.

После подбора коэффициентов получаем:

для 30 минут: $A = 1,28 \cdot 10^{-3}$, $\beta = 1,42$, $R = 3,98 \cdot 10^{-4}$.

Если сравнить эту функцию без множителя A с функцией зависимости распределения профиля скоростей (5), то видно полное соответствие характера распределения (рис. 12).

Это сходство позволяет использовать коэффициенты из расчета гидродинамического режима в этой модели. После подбора коэффициентов получаем:

- для 30 минут $A = 1,44 \cdot 10^{-3}$;
- для 45 минут $A = 2,51 \cdot 10^{-3}$;
- для 60 минут $A = 3,11 \cdot 10^{-3}$.

Так как толщина металлизации растет линейно, можно раскрыть коэффициент $A = a \cdot t$, где t – время металлизации, с.

Таким образом,

$$z(y, t) = a \cdot t \cdot e^{-\beta\left(\frac{y}{2R}\right)^2}, \quad (7)$$

где $z(y, t)$ – толщина металлизации, м; t – время, с; a – коэффициент, равный $7,778 \cdot 10^{-7}$ м/с.

Аппроксимирующие графики представлены на рис. 13.

Из этой функции можно получить следующие характеристики системы струйной металлизации:

- за одну секунду в центре потока осаждается $\sim 0,778$ мкм меди.
- для осаждения 25 мкм меди необходимо металлизировать один участок в течение 32,142 с.

АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ И ВЫВОДЫ

В процессе анализа гидродинамических режимов в процессе струйной металлизации ПП описан расчет функции распределения профилей скоростей потока электролита при соударении с металлизруемой ПП для разного радиуса выходного сопла.

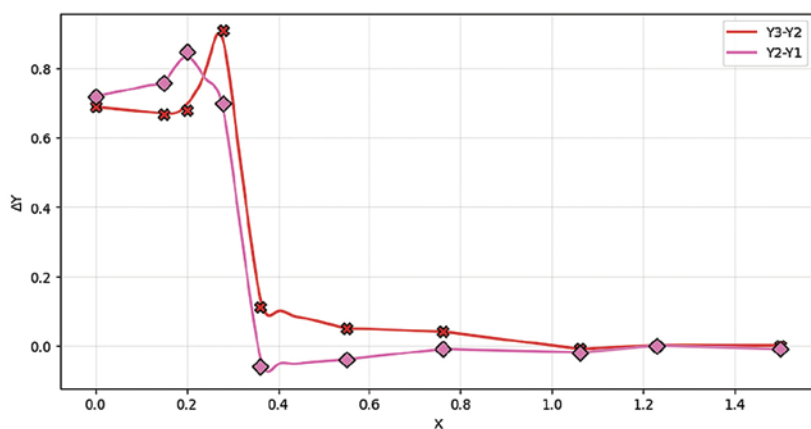


Рис. 11. Сравнение разностей между графиками полученных значений толщины металлизации

X – удаление от центра потока электролита, ΔY – разница между значениями толщины металлизации между опытами 1 и 2, и опытами 2 и 3

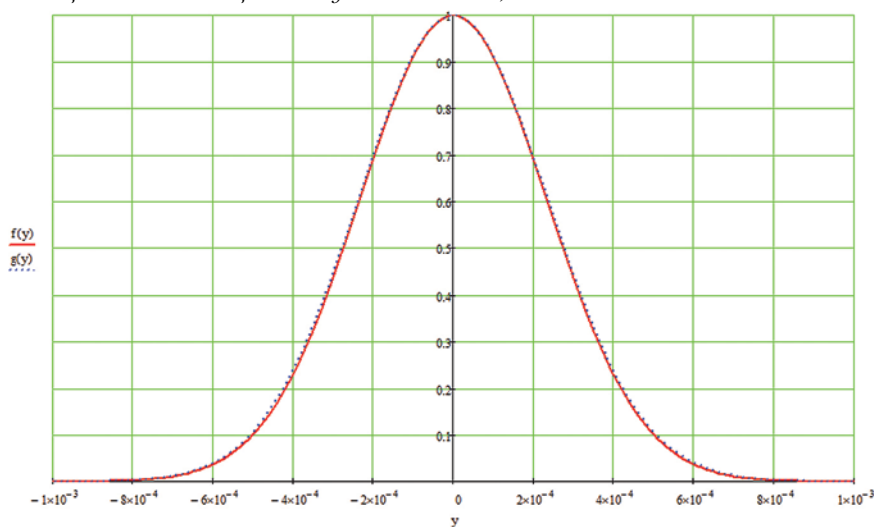


Рис. 12. Сравнение функций распределения профиля скоростей и распределения толщины металлизации

$f(y)$ – функция зависимости распределения профиля скоростей (5), $g(y)$ – функция зависимости распределения толщины металлизации (6)

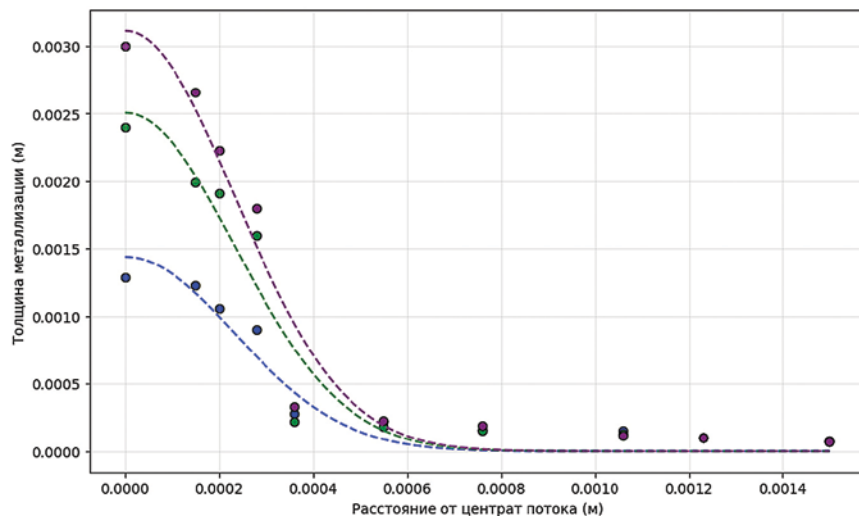


Рис. 13. Аппроксимация распределения толщины осажденной меди по удалению от центра потока электролита

В результате экспериментов получены металлизированные участки ПП при разном времени металлизации. С помощью сравнения разностей толщины металлизации выявлено, что рост ее толщины линейный, что упрощает моделирование процесса.

Создана модель струйного электроосаждения меди, учитывающая время металлизации, расстояние от центра потока электролита, а также радиус выходного сопла. Металлизация 25 мкм меди в центре потока происходит в течение примерно 32 с.

Полученный коэффициент a , имеющий размерность [м/с], служит основанием для предположения, что скорость металлизации также влияет на процесс электроосаждения. Описание характера влияния скорости потока на процесс металлизации планируется в дальнейших исследованиях. Также еще предстоит выяснить влияние токовых режимов на процесс металлизации, что должно быть задачей отдельного исследования.

ЛИТЕРАТУРА

1. Абрамович Г.Н. Теория турбулентных струй. – 2-е изд., испр. и доп. – М.: Эко-лит. – 2011. – 720 с.
2. Alkire R.C., Chen T.J. High-speed selective electroplating with single circular jets//J. Electrochem So. – 1982. – Vol.129(11). – P.2424–32.
3. Dover S.J., Rennie A.E.W., Bennett G.R. Rapid prototyping using electrodeposition of copper. –In: SFF symposium Texas. 1996, p. 191–8.
4. Fletcher J.C., Oliver G.D. Scanning nozzle plating system. – U.S. patent 3810829 (1974).
5. Kozak J., Rajurkar K., Balakrishna R. Study of electrochemical jet machining process// J. Manuf Sci E-T ASME. – 1996. – Vol.18. – P.490–8.
6. Kunieda M., Katoh R., Mori Y. Rapid prototyping by selective electrodeposition using electrolyte jet//Ann. CIRP. – 1998. – Vol.47(1). – P.161–4.
7. Li Q., Walker J. Prediction of electrodeposition rates from an impinging jet // AICHE Journal. – 1996. – Vol. 42. – No. 2. – P. 391–404.
8. Mridul Singh Rajput, Pulak Mohan Pandey, Sunil Jha. Modelling of high speed selective jet electrodeposition process//J. of Manufacturing Processes. – 2015. – Vol. 17. – P.98-107. ISSN 1526-6125. – <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2014.07.012>. ■

Современные возможности морских средств навигации (МСН) определяют их роль и значение в вооруженной борьбе на море, навигационной безопасности, в системе научных знаний и практической деятельности человека в Мировом океане.

Развитие МСН в значительной степени обусловлено успехами в совершенствовании современной морской компьютерной техники и ее широким применением практически на всех кораблях (судах) Военно-морского Флота Российской Федерации (ВМФ). Цифровая обработка навигационной информации в настоящее время осуществляется повсеместно. Важнейшими предпосылками этого являются:

- развитие научно-методического потенциала, обеспечивающего возможность достоверной оценки навигационно-гидрографического и гидрометеорологического обеспечения (НГГМО) в океанской, морской и ближней зонах с использованием электронной навигационной информационной системы (ЭНИС) нового поколения на отечественной операционной системе Astra Linux.
- широкое использование автоматизации расчетных задач маневрирования кораблей и судов ВМФ, а также комплексном анализе навигационной информации на основе интеграции и картографической интерпретации информационных ресурсов при выполнении боевых задач.

Обеспечение безопасного расхождения кораблей (судов) с целями является одной из важнейших задач навигации. При возникновении ситуации сближения с несколькими целями необходимо своевременно оценить степень их опасности и в возможно короткий срок определить возможные варианты изменения курса или скорости собственного

корабля (судна).

Для решения данной задачи применяются различные графические методы, основанные на построении линий относительного движения (ЛОД) и секторов опасных относительных курсов (СООК). Такие методы позволяют наглядно представить навигационную ситуацию и определить параметры безопасного манёвра. Однако при ручном выполнении расчётов и построений требуется значительное количество времени, особенно при наличии нескольких целей, что создает дополнительную напряженность деятельности судоводителя. [1]

В цифровую эпоху задача безопасного расхождения с множеством целей может решаться и решается автоматизированными системами, которые встроены в САРП или БИУС, но, как правило, эти системы дают судоводителю готовый ответ, который он должен принять, полагаясь на надёжность алгоритмов, программного обеспечения самой системы. Но пока на мостике корабля или судна главным остаётся человек, судоводителю необходимо наглядное представле-

ние решаемой задачи для осмысленного принятия решения.

В связи с этим, кроме решения задач навигации, в ЭНИС нового поколения реализован программный модуль обеспечения безопасного расхождения корабля (судна) с несколькими целями, позволяющий ускорить выполнение построений и уменьшить вероятность ошибок, а также отображать навигационную ситуацию графически, методами относительных смещений, секторов опасных относительных курсов и построения треугольников скоростей для наглядного представления решаемой задачи.

Программная реализация расчётной части основана на математической модели относительного движения судов посылке решение задач маневрирования производится на электронном маневренном планшете и предназначена для автоматизации графических построений, применяемых при оценке ситуации сближения кораблей (судов).

В программной реализации современной ЭНИС применены известные и проверенные способы решения за-

ПРОГРАММНЫЙ МОДУЛЬ ОБЕСПЕЧЕНИЯ БЕЗОПАСНОГО РАСХОЖДЕНИЯ КОРАБЛЕЙ (СУДОВ) С ЦЕЛЯМИ В ЭНИС НОВОГО ПОКОЛЕНИЯ НА ОТЕЧЕСТВЕННОЙ ОПЕРАЦИОННОЙ СИСТЕМЕ ASTRA LINUX

Л.С. Хабаров, канд. техн.наук,
нач. отдела программного обеспечения АО «МНС»,
контакт. тел.

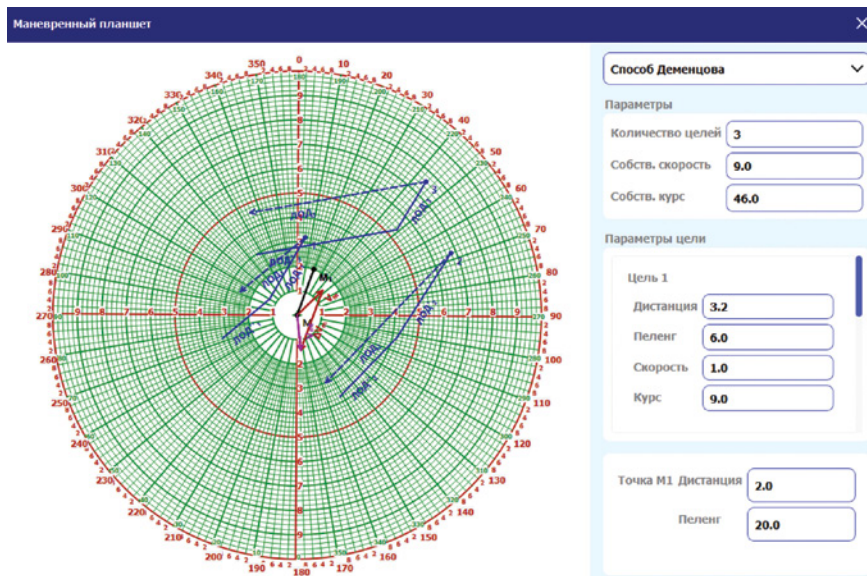


Рис. 1. Рабочее окно ЭНИС, способ Деменцова

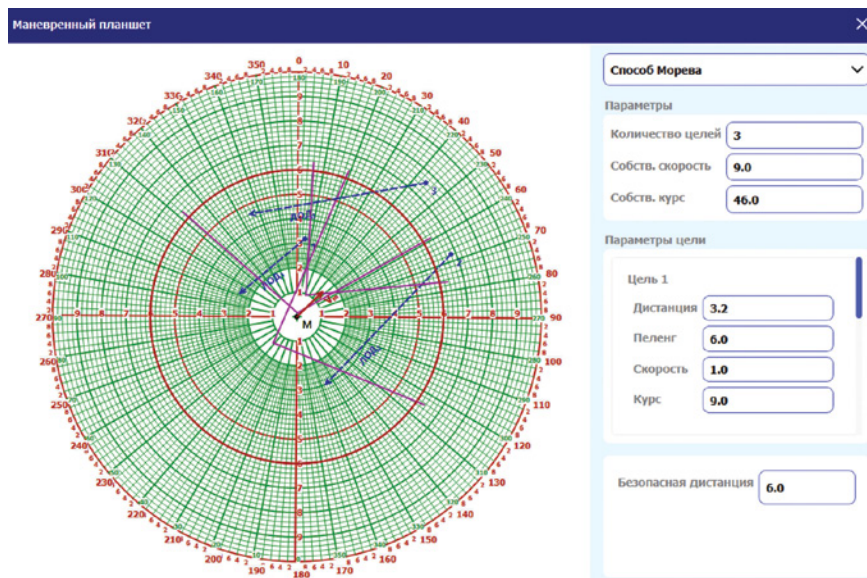


Рис. 2. Рабочее окно ЭНИС, способ Морева

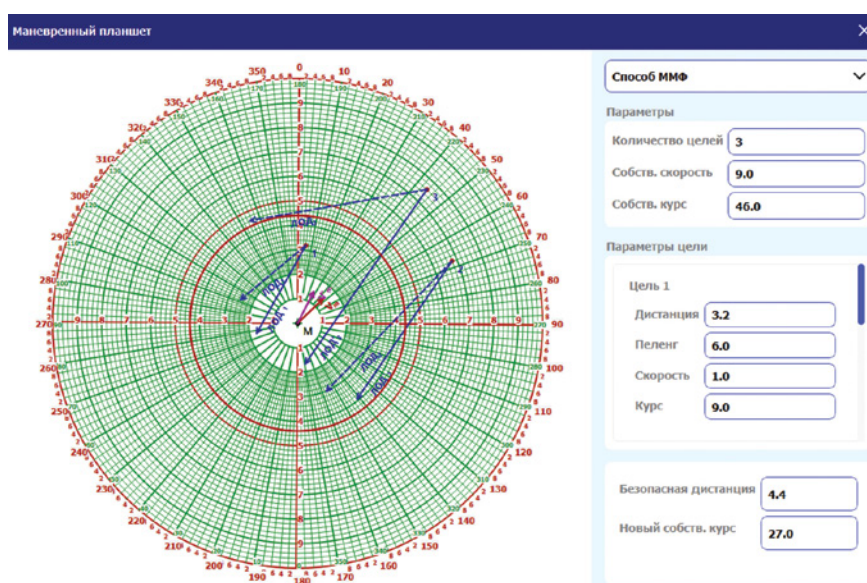


Рис. 3. Рабочее окно ЭНИС, способ ММФ

дач расхождения Деменцова, Морева и ММФ, что позволяет представить решение задачи в известных каждому судоводителю обозначениях. Также в дальнейшем для решения задачи расхождения с несколькими целями предполагается внедрение в ЭНИС метода возможных областей позиций.

Программный модуль формирует и отображает на экране маневренный планшет Ш-26Э с полярной сеткой с делениями по дистанции и направлению, отображает положение собственного корабля (судна) и нескольких целей, производит построение линий относительного движения (ЛОД), визуально выделяет потенциально опасные направления и производит расчет относительного курса целей. Программный модуль безопасного расхождения с целями включает в себя и другие области применения:

- обеспечение решения специальных задач ВМФ, связанных с применением минного оружия и противоминными действиями;

- обеспечение проведения специальных операций в прибрежной зоне;
- обеспечение применения безэкипажных катеров (БЭК);
- обеспечение обустройства нефтедобывающих и газодобывающих комплексов на континентальном шельфе.

Указанные факторы повышают значение МСН и обуславливают необходимость интенсификации работ по их развитию в части автоматизации расчетных задач. Морская компьютерная техника причислена к наиболее приоритетным направлениям технической политики ВМФ.

Основные направления научно-технических разработок и конечная программные продукты в МСН связаны между собой научно-техническими, функциональными, технологическими и организационными отношениями, обуславливающими необходимость комплексного, системного и программно-целевого подхода к управлению ее дальнейшим развитием. Это особен-

но актуально в условиях современного подхода в развитии отечественного ВМФ. [2]

Решение задач по обеспечению навигационной безопасности плавания, боевой и повседневной деятельности ВМФ, современное состояние и существующие проблемы в развитии Российского морского приборостроения вызывают необходимость разработки новых образцов техники и их дальнейшего развития и совершенствования.

ЛИТЕРАТУРА

1. МО СССР ГУНиО. Правила использования радиолокационных навигационных станций в кораблевождении/редактор Е. А. Флягин; технический редактор С. Н. Холстинина – ЦКФ ВМФ, 1984 – с. 56-60.
2. Каманин В. И., Лаврентьев А. В., Скубко Р. А. Штурман флота Справочник по кораблевождению / В. И. Каманин, А. В. Лаврентьев, Р. А. Скубко – Москва: Военное издательство, 1986 – 527 с. ■

Практика применения безэкипажных маломерных судов свидетельствует о неуклонном росте числа применений полностью автономных решений, что объясняется повышением значимости приложений, в которых дистанционное операторское управление неэффективно или вовсе неприменимо. Так, в частности, использование канала связи порождает риск его перехвата, и даже само его существование свидетельствует о наличии дистанционно-управляемого объекта, а значит, может спровоцировать его поиск стороной-антагонистом. Однако переход к автономному принятию решений бортовыми вычислительными средствами актуализирует ряд подзадач, среди которых немаловажное значение имеют задачи самостоятельного восприятия техническим объектом окружающей его обстановки.

МЕТОДЫ РЕГИСТРАЦИИ ОКРУЖАЮЩЕЙ ОБСТАНОВКИ БОРТОВЫМИ СИСТЕМАМИ АВТОНОМНЫХ МАЛОМЕРНЫХ СУДОВ

Как свидетельствуют научные публикации, в настоящее время в автономных судах применяется несколько основных принципов регистрации окружающей обстановки и обнаружения объектов (рис. 1).

Широко применяются оптические методы [1–2]. Системы такого типа во многом базируются на дистанционно-управляемых решениях, при которых регистрация окружающей среды в видимом оптическом диапазоне была наиболее естественна для человека-оператора, однако на практике при реализации автономных решений возникает задача автоматического декодирования изображений, имеющих значительное количество особенностей – замутненность, забликованность, геометрические искажения, наличие теней, случайных составляющих и тому подобных артефактов, существенно затрудняющих достоверное выявление физически существующих объектов.

От перечисленных проблем во многом свободны методы гидролокации, регистрирующие отражение сгенерированного сигнала только от физичес-

ПОДСИСТЕМА ОБНАРУЖЕНИЯ ОБЪЕКТОВ НА ВОДНОЙ ПОВЕРХНОСТИ ДЛЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО МАЛОМЕРНОГО АВТОНОМНОГО СУДА

А. Е. Васильев, д-р техн. наук, зав. кафедрой ТСМ,
Д. Е. Голубева, ст. преподаватель,
Д. А. Знаменский, магистрант,
В. А. Карпенко, ст. преподаватель,
В. Д. Ковалев, ст. преподаватель,
СПбГМТУ,
контакт. тел. (812) 713-84-05

ки существующих объектов [3–4], однако методам этого рода свойственны явления слабо предсказуемого рассеяния и поглощения сигнала вследствие неоднородности среды, а также в ряде случаев – многократных отражений сигнала и наличия шумовых составляющих.

Известны также методы, основанные на иных принципах регистрации окружающей обстановки – например, магнитометрические [5], регистрирующие локальные изменения магнитного поля в присутствии объектов, содержащих ферромагнитные материалы. Подобные методы применимы в относительно более узком количестве приложений, так, например, магнитометрический метод непригоден для обнаружения неметаллических объектов.

Возможны сочетанные решения, использующие комбинации перечисленных выше методов и наследующие не только их достоинства, но и недостатки, а, следовательно, неоднозначность принятия решения в случае выявления объекта в определенной зоне окружающей сцены одним методом и невыявления его в этой же зоне другим методом.

Кроме того, оптические и комбинированные методы требуют значительной вычислительной мощности бортовой системы [6]; известно, что рост сложности микропроцессора и его тактовой частоты приводит к повышению энергопотребления и одновременно к повыше-

нию риска сбоя вычислительного процесса, следовательно, применение этих методов может негативно сказываться на таких эксплуатационных показателях малого безэкипажного судна, как продолжительность автономной работы и устойчивость к внешним электромагнитным воздействиям как естественного происхождения (например, удар молнии), так и искусственного (например, радиоэлектронные генераторы помех).

Таким образом, проблема выбора методов и средств обнаружения объектов окружающей среды для автономных маломерных судов все еще далека от своего окончательного разрешения.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ АВТОНОМНОЕ МАЛОМЕРНОЕ СУДНО КАК ПЛАТФОРМА ДЛЯ НАУЧНЫХ И УЧЕБНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Коллективом кафедры технологии судового машиностроения СПбГМТУ разработан и применяется в учебных и исследовательских целях робототехнический плавучий комплекс многофункционального назначения [7] (рис. 2). Авторами предлагается подход к организации процесса разработки, отладки и оценивания экспериментальных показателей функциональных подсистем автономных маломерных судов на основе данного комплекса. Так, в состав технического оснащения экспериментального комплекса входит система технического зрения, которая, благодаря модульному принципу построения комплекса, может быть заменена иной, с альтернативным принципом действия.

С применением данного подхода открывается возможность оценивать потребительские характеристики комплекса с альтернативными вариантами реализации его подсистем для использования результатов оценивания в исследовательских и образовательных целях и выбора его оптимальной конфигура-



Рис. 1. Некоторые методы построения систем оцувствления

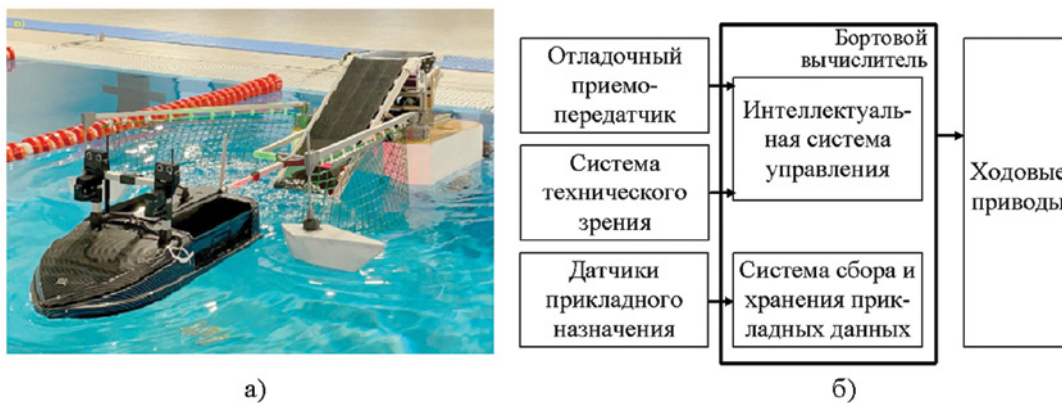


Рис. 2. Экспериментальный комплекс: а – внешний вид, б – обобщенная схема

ции для конкретного прикладного применения.

ВАРИАНТ РЕАЛИЗАЦИИ УЛЬТРАЗВУКОВОЙ СИСТЕМЫ ОЧУВСТВЛЕНИЯ

Для описанного выше комплекса в экспериментальных целях был разработан вариант ультразвуковой системы очувствления (рис. 3).

В корпусе прибора размещен ультразвуковой модуль, состоящий из излучателя и приемника, сервомашинка, обеспечивающая позиционирование ультразвукового модуля в заданное угловое положение, и микроконтроллер, обеспечивающий последовательное изменение угла позиционирования ультразвукового модуля, фиксацию отраженного от объекта сигнала и,

в случае его наличия, пересчет текущего углового положения в дистанцию до объекта. Полученная карта результатов сканирования передается на бортовой вычислитель автономного маломерного судна и используется им в процессе принятия решения об изменении курса судна.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предлагаемый авторами подход позволяет выполнять оценивание эксплуатационных характеристик функциональных подсистем автономных маломерных судов, повысить качество подготовки профессиональных кадров в области их разработки, а также внести вклад в интенсификацию процессов импортозамещения и импортоопережения в отечественном судостроении.

ЛИТЕРАТУРА

1. Обнаружение, распознавание и локализация объекта в водной среде с заданными отличительными признаками при помощи системы технического стереозрения/Кабанов А.А., Крамарь В.А., Крамарь О.А., Фатеев С.И., Карпентян В.А.//Прикаспийский журнал: управление и высокие технологии, 2023. – № 2 (62).– С. 59–73.
2. Шапыгин А.В., Рыбаков А.В. Способ и система обнаружения предметов в воде для маломерного судна. – Патент РФ на изобретение № 2795847. Оpubл.12.05.2023.//Бюлл.№ 14.
3. Мартынова Л.А., Пашкевич И.В. Метод обнаружения малоразмерных объектов на морской поверхности//Машиностроение: сетевой электронный науч.журнал. – 2025. – Т. 12. – № 1. – С. 38–45.
4. Ультразвуковая система обнаружения препятствий движению подвижного объекта/Громов В.В., Липсман Д.Л., Мосалёв С.М., Рыбкин И.С., Сутягин А.С., Фуфаев Д.А., Хапалов В.С.//Патент РФ на изобретение № 2634603. Оpubл. 01.11.2017//Бюлл.№ 31.
5. Соколов Н.А., Рычков А.В. Повышение поисковых возможностей автономных необитаемых подводных аппаратов за счет применения многоканальных магнитометрических систем//Изв. ЮФУ. – Сер.: Технические науки. – 2021. – № 1 (218).– С. 59–72.
6. Шакирзянов Р.М., Шлеймович М.П., Новикова С.В. Метод автоматического позиционирования беспилотных аппаратов на основе распознавания сигнальных радиально-симметричных маркеров подводных целей//Автоматика и телемеханика. – 2023. – № 7. – С. 93–120.
7. Опыт технической реализации экспериментального маломерного автономного беспилотного судна/Васильев А.Е., Вегнер А.В., Карпенко В.А., Ковалев В.Д., Соколов Л.Л.//Морской вестник. – 2026. – № 2 (98).– С. 13–16. ■

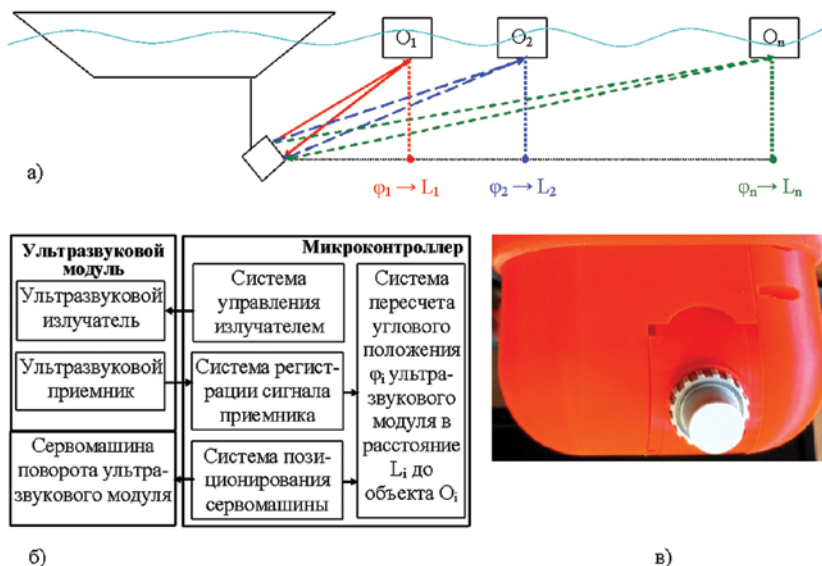


Рис. 3. Ультразвуковая система очувствления: а – иллюстрация принципа действия, б – обобщенная структура, в – внешний вид модуля в сборе для крепления под днищем

Арктика – один из самых уязвимых регионов планеты, где последствия глобального потепления проявляются особенно резко. В последние десятилетия температура здесь повышается в 2–4 раза быстрее, чем в среднем по миру. Это приводит к таянию льдов, исчезновению многолетней мерзлоты, изменению экосистем, угрозам для коренных народов.

В настоящее время Арктика является зоной экономических интересов как стран, омываемых северными морями и имеющими протяженные береговые линии и права на разработку природных ресурсов в своих исключительных экономических зонах (Дания, Канада, Норвегия, Россия и США), так и стран, для которых доступ к арктическим ресурсам – это своеобразный залог успешного промышленного развития (Китай, Япония и Республика Корея). Данные государства обладают достаточным финансово-экономическим и научно-технологическим потенциалом для активного участия в освоении Арктики.

Нефтяные запасы Арктики сосредоточены в разных регионах, включая шельфы России, Норвегии, Канады и США. Оценки запасов различаются, так как этот регион все еще слабо изучен. По состоянию на начало 2023 г. объем запасов арктической шельфовой нефти России (категорий $A+B_1+C_1$, B_2+C_2) оценивался в 604,2 млн. т. По оценкам, запасы углеводородов на российском арктическом шельфе могут обеспечить до 20–30% от общей добычи нефти в стране к 2050 г. Однако многие месторождения пока остаются слабо изученными, а их разработка сопряжена со сложностями из-за суровых климатических условий (экстремальные

температуры, ледяной покров, полярная ночь).

Эксплуатация шельфового нефтяного месторождения сопряжена с экологическими рисками, которые включают загрязнение окружающей среды, аварии, шумовое воздействие и нарушение биологических миграционных путей морских обитателей. Эти риски возникают на всех этапах разработки месторождения и транспортировки углеводородного сырья.

Одной из основных проблем при эксплуатации морского месторождения является выбор способа транспортировки добываемой продукции, который нельзя приуменьшать. Ключевой транспортной магистралью в Арктическом регионе, которая обеспечивает кратчайший путь по морю из европейской части России на Дальний Восток и открывает доступ к ресурсам Арктики и Сибири, является Северный морской путь (СМП), развитие которого актуально в разных аспектах: экономическом, стратегическом, экологическом и международном.

В настоящее время углеводороды, добытые на шельфе, транспортируют либо танкерами, либо по трубопроводам. Предпочтение, по ряду причин, отдается трубопроводам. Этот способ

дает возможность бесперебойной поставки углеводородов к берегу независимо от погодных условий, помимо этого, аварии на судах более опасны, чем на трубопроводах, поскольку масштабы загрязнений возрастают в несколько раз.

Нефтяное загрязнение поверхности моря и береговой черты – наиболее опасное последствие разливов нефти из-за аварий и различных повреждений при транспортировке добытой нефти с платформ к потребителям на побережье.

Существует достаточно большое количество моделей прогнозирования распространения нефти и нефтепродуктов при разливе на морских акваториях. Но возникает необходимость создания единой модели, которая будет способна учитывать различные параметры.

РАЗЛИВ НЕФТИ И НЕФТЕПРОДУКТОВ

Эксплуатация морского транспорта в арктических регионах России, особенно в зоне СМП, оказывает комплексное и многоплановое воздействие на арктические экосистемы. Растущая интенсивность судоходства (рис. 1) [1], связанная с освоени-

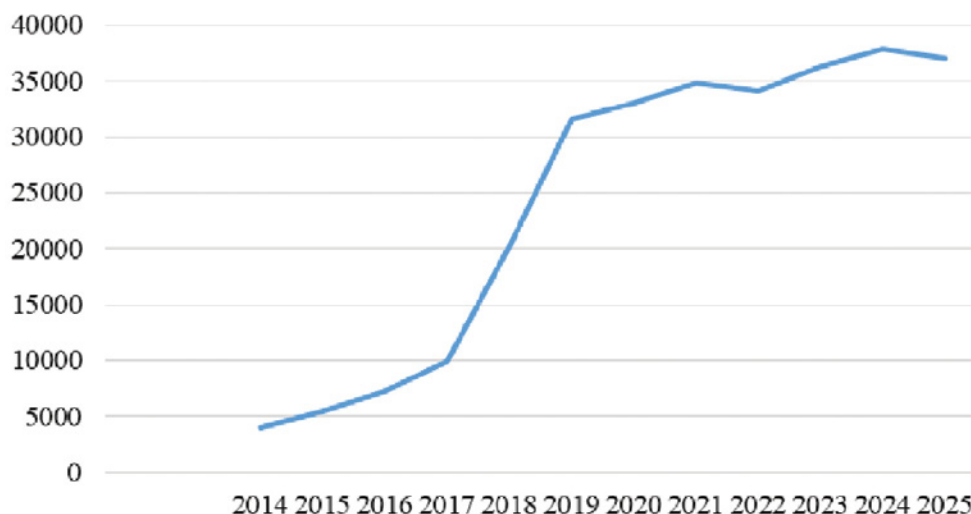


Рис. 1. Объем перевозок грузов в акватории СМП 2014–2025 гг, тыс. т

ОБОСНОВАНИЕ НЕОБХОДИМОСТИ СОЗДАНИЯ КОМПЛЕКСНОЙ МОДЕЛИ ДЛЯ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ РАЗЛИВОВ НЕФТЕПРОДУКТОВ

В.Р. Долгомирова, ассистент, аспирант кафедры ПЭиКБ,

Г.В. Черкаев, канд. техн. наук, зав. кафедрой СЭУ СиО,

доцент кафедры ПЭиКБ,

Ю.Ю. Злобина, аспирант кафедры ПиТПМПАиР,

А.И. Н. Мханна, канд. физ.-мат. наук, зав. кафедрой ПЭиКБ,

СПбГМТУ,

контакт. тел. +7 (953) 349 7749

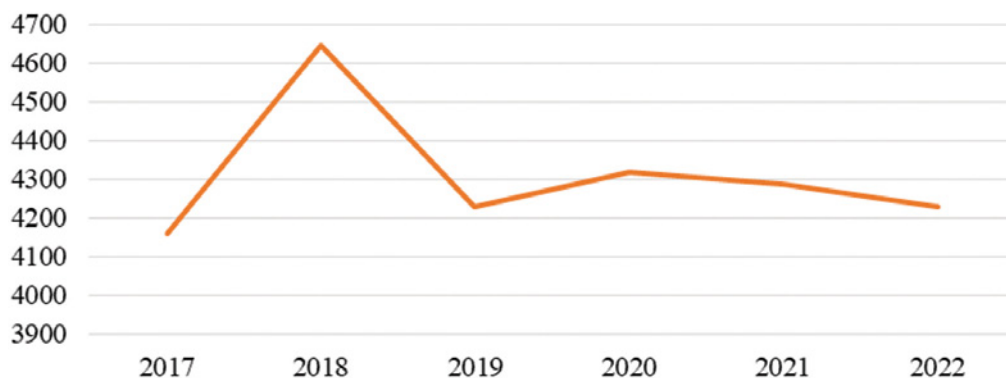


Рис. 2. Грузооборот трубопроводного транспорта (млн. т-км) с 2017 по 2022 г.

ем природных ресурсов и транзитом грузов, приводит к целому ряду негативных последствий.

Загрязнение может быть вследствие аварий судов, которые приводят к утечкам нефти; сброса балластных вод, содержащих остатки нефтепродуктов; утечки при бункеровке и разливе нефти. Также разливы нефти и нефтепродуктов возникают при работе судовых энергетических установок из-за аварий при бункеровке и заправке судна (переполнение топливных цистерн, повреждение заправочных шлангов и падение давления в системе); повреждения топливных танков (аварии или столкновения судов, приводящие к нарушению герметичности); разгерметизации трубопроводов (коррозия и прорывы магистралей высокого давления, подающих тяжелое судовое топливо (мазут) к дизельным установкам); несанкционированного сброса льяльных и нефте-содержащих вод.

Морской трубопровод, как уже сказано, считается более безопасным способом транспортировки, чем перевозка танкером. На рис. 2 показана динамика грузооборота трубопроводного транспорта (млн. т-км) с 2017 по 2022 г. [2].

Утечки нефти из донных нефтепроводов могут возникать из-за появления коррозионных свищей в стенках труб, при дефектах в процессе производства или сварки, а также вследствие появления повреждений, а именно трещин или разрывов, вызванных действием нагрузок различных типов. Также представляют опасность ледовые нагрузки в замерзающих морях.

Из-за своих небольших размеров свищи и микротрещины трудно обнаружить, на это также влияет и глубина расположения нефтепровода. Небольшие утечки из свищей имеют малую интенсивность. Поэтому всплывающую на поверхность нефть невозможно обнаружить с платформ, берега или судна, поскольку пятна имеют очень маленький размер. В арктичес-

ких морях подобные разливы могут продолжаться длительное время из-за сложности обнаружения в ледовой обстановке. В зимнее время ледовый покров скрывает утечки нефти. Лед впитывает нефтепродукт, не позволяя растекаться или испаряться. Последствия нефтяного разлива сохраняются в толще льда до весеннего таяния. Такие незначительные утечки нефти из-за длительности воздействия на окружающую среду могут вызвать серьезные экологические последствия в водной среде и на побережье, также нанося серьезный ущерб рыбному хозяйству и зонам отдыха.

Поэтому при проектировании сооружений для разработки шельфовых месторождений нефти требуется обязательная предварительная оценка воздействия на окружающую среду функционирования добывающей нефти техники, танкерного флота и трубопроводов.

Таким образом, *причины* и источники *нефтяных загрязнений* можно разделить на *естественные*: землетрясения, ураганы и штормы, береговая эрозия и природные эрозионные процессы, вулканические извержения и др., и *связанные с деятельностью человека*: аварии при транспортировке нефти танкерами, утечки и разрывы трубопроводов; морское бурение, сопряженное со значительными экологическими рисками и чреватое разливами нефти в результате производственных сбоев и аварий; сбой в работе береговых сооружений. Незаконная деятельность представляет собой собой дополнительную угрозу.

ПОСЛЕДСТВИЯ НЕФТЯНЫХ РАЗЛИВОВ

Разлив нефти и нефтепродуктов (бензина, дизельного топлива, мазута и т.д.) представляют серьезную опасность для окружающей среды, оказывая негативное воздействие на воду, почву, воздух и живые организмы. Степень такой опасности напрямую зависит от объема разлива, состава

нефти и продолжительности ее контакта с объектами окружающей среды.

Загрязнение гидросферы. После попадания нефтепродукта в водный объект нефтяное пятно под влиянием ветра и течения начинает перемещаться, происходит смешивание нефти с водой с образованием эмульсий, часть нефтепродуктов испаряется, часть выпадает в осадок. Под действием ветра и течения нефтяное пятно способно распространиться на значительное расстояние. Нефть попадает в воду и, как правило, не растворяется, а растекается по поверхности, образуя тонкую пленку, которая может занимать огромные площади, зависящие от объема разлива и погодных условий.

Нефтяная пленка действует как барьер между водой и атмосферой, препятствуя нормальному обмену кислородом, а также проникновению солнечного света в воду, необходимого для фотосинтеза, процесса, в ходе которого водоросли и фитопланктон производят кислород и служат основой пищевой цепи в водной среде. При отсутствии солнечного света фотосинтез замедляется или прекращается, что приводит к сокращению количества кислорода и нарушению пищевых связей. Сочетание недостатка кислорода и солнечного света, а также токсическое воздействие компонентов нефти приводит к массовой гибели водных организмов. Особенно уязвимы личинки и мальки рыб, а также другие мелкие организмы, составляющие основу пищевой цепи. Млекопитающие, птицы и другие животные могут пострадать от отравления, ожогов. Кроме того, нефть может накапливаться в тканях животных, что приводит к хроническим заболеваниям и снижению репродуктивной способности.

Загрязнение нефтью может привести к изменению состава воды, гибели водорослей и донных организмов, а также к изменению путей миграции и жизненных циклов животных.

Загрязнение донных отложений происходит вначале из-за оседания нефти под действием гравитации и их высокой сорбционной способности. Затем течения и приливы могут переносить загрязненные отложения на большие расстояния, расширяя зону поражения. Помимо этого, донные организмы, такие как черви и моллюски, перемешивают донные отложения, способствуя проникновению нефти вглубь, и вновь выносят загрязненные частицы на водную поверхность.

На донные организмы нефть оказывает такое же существенное влияние, как и на водные. Разливы нефти могут привести к гибели беспозвоночных, рыб и других обитателей дна, к переносу загрязняющих веществ по пищевой цепи и их накоплению в организмах более крупных хищников. Загрязнение нефтью приводит к изменению видового состава донных сообществ, часто с доминированием более устойчивых к загрязнению видов.

Разложение нефти микроорганизмами требует кислорода, что может привести к его дефициту в донных отложениях и гибели организмов, нуждающихся в нем.

Нефть, находящаяся в донных отложениях, может медленно высвобождаться обратно в воду, вызывая хроническое загрязнение и долгосрочное воздействие на экосистему.

Загрязнение атмосферы. При разливе нефти или нефтепродуктов в атмосферу попадает сложная смесь загрязняющих веществ, таких как летучие органические соединения

(ЛОС), мелкодисперсные частицы (PM2.5 и PM10), сероводород и другие сернистые соединения, продукты горения.

ЛОС и оксиды азота под воздействием солнечного света образуют озон и другие компоненты смога, которые вредны для здоровья человека и растений. Оксиды серы и азота могут вызывать кислотные дожди, которые повреждают почвы, водоемы и растительность. Углекислый газ в больших концентрациях в атмосфере способен вызвать изменение климата – парниковый эффект.

Экономические потери. Воздействие разливов нефти на местную экономику может быть разрушительным. Малый бизнес, который занимается рыболовством, туризмом и другими видами деятельности, связанными с морем, может понести значительные убытки из-за загрязнения водной среды. Кроме того, многие рабочие места в этих отраслях могут быть потеряны из-за невозможности продать загрязненные морепродукты или привлечь туристов в пострадавшие районы.

Помимо прямого экономического воздействия, разливы нефти также оказывают косвенное воздействие на местную экономику. Например, усилия по очистке, необходимые после разлива, могут быть дорогостоящими и отнимать много времени, отвлекая ресурсы от других важных проектов и инициатив.

Кроме того, разливы нефти также могут иметь серьезные последствия для здоровья жителей пострадавшего района. Воздействие сырой нефти и связанных с ней химикатов может

привести к проблемам с дыханием, раздражению кожи и т.п. В некоторых случаях эти последствия для здоровья могут сохраняться еще долгое время после завершения первоначальных усилий по очистке [3].

Аварийные ситуации, случающиеся при транспортировке нефти, которые чаще всего влекут за собой разлив нефтепродуктов. В числе таких ситуаций – нарушение герметичности топливного танка; столкновение судов; пожар, взрыв на судне. Одна из крупнейших экологических катастроф в России произошла во время шторма в Керченском проливе 15 декабря 2024 г. из-за разлома корпусов двух российских нефтяных танкеров класса «Волгонефть». В результате аварии мазут, перевозимый судами, частично попал в акваторию Черного моря. К середине января мазутом были загрязнены не менее 54 км береговой линии Краснодарского края и 15 км побережья Крыма. По подсчетам Greenpeace, площадь загрязнения нефтепродуктами достигла 400 км². Количество таких аварийных ситуаций, как затопление судна; посадка судна на мель и др., с 1974 по 2022 г. приведены на рис. 3 [4]. На магистральных трубопроводах в 2024 г. произошло три аварии, а в 2025 г. – одна [5].

МОДЕЛИ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ РАСПРОСТРАНЕНИЯ НЕФТИ И НЕФТЕПРОДУКТОВ ПРИ РАЗЛИВЕ НА МОРСКИХ АКВАТОРИЯХ

В современном мире развитые государства активно используют мате-



Рис. 3. Статистика разливов нефтепродуктов в зависимости от причин аварийных ситуаций морских судов

матические модели для прогнозирования распространения нефтяных разливов. Они реализованы в специализированном программном обеспечении. Для эффективного применения данных программ требуется их интеграция с актуальными данными гидрометеорологических прогнозов для конкретного региона.

Международные модели прогнозирования распространения нефти и нефтепродуктов при разливах на морских акваториях включают программные комплексы, такие как OSRA, COZOIL, OSIS, PADM, OSCAR, OILMAP, ADIOS, MOHID, GNOME, PHOENICS, HyperSuite, MEDSLIK, SeaTrackWeb и др. Аналогичные российские модели включают такие программные комплексы, как INMOM, SPILLMOD, OilMARS, FOTS, ГеоЕСИМО и др.

Наиболее эффективными и широко применяемыми моделями прогнозирования распространения нефти являются модели:

- MEDSLIK (Mediterranean Sea Leakage & Integrated Kinematic model) – модель, разработанная специально для средиземноморского региона, обладает проверенной точностью и хорошей адаптивностью к различным типам разливов.
- GNOME (General NOAA Oil

Modeling Environment) – модель, подходящая для широкого спектра морских условий и часто используемая в планировании оперативных действий.

- OILMAP (Oil Spill Model and Response System) – модель, совмещающая оценку риска и инструменты реагирования, что делает ее особенно ценной для портов и прибрежных зон с высокой интенсивностью судоходства.

Эти три модели часто находятся в верхнем списке рекомендаций международных организаций (UNESCO-IOC, IACS, EPA) и имеют открытый или частично открытый код, позволяющий интегрировать их в локальные системы мониторинга и планирования реагирования. При выборе конкретной модели стоит учитывать географический регион, доступ к гидрологическим данным и потребности в оперативном стратегическом планировании. Все модели зависят от доступности и качества исходных данных, таких как метеорологические условия, течения, батиметрия. В настоящее время не для всех акваторий российских морей доступны в оперативном режиме данные гидрометеорологических прогнозов.

Большая часть моделей основана на применении лагранжевой модели, совокупности спиллетов [6–29].

В таблице представлены результаты анализа рассматриваемых моделей нефтяных разливов.

Анализ выполнен на основе следующих критериев, указанных в таблице: учет типа нефти, процессов трансформации, использование геоинформационных систем (ГИС), моделирование совокупности капель/спиллетов, применение лагранжевой модели, учет ледовой обстановки, возможность зондирования, моделирование 3D толщи воды и учет особенностей прибрежной зоны.

Тип нефти (например, COZOIL, GNOME), как следует из таблицы, учитывают: девять из тринадцати международных моделей. Это критически важно, так как физико-химические свойства нефти (вязкость, плотность, содержание смол) напрямую влияют на процессы растекания, испарения, эмульгирования и растворения. Из российских моделей только одна – OilMARS – явно указывает на учет данного параметра, что может указывать на более обобщенный подход или специализацию остальных моделей на иных аспектах.

Моделирование процессов трансформации включают десять международных моделей (например, MOHID, MEDSLIK), они способны прогнозировать не просто перенос, но и изменение состояния нефти (испарение, образо-

Таблица

Сравнительная характеристика моделей прогнозирования распространения нефтяных разливов

№ п/п	Программа	Тип нефти	Процессы трансформации	ГИС	Совокупность капель/спиллеты	Лагранжевая модель	Ледовая обстановка	Зондирование	3D	Прибрежная зона
Международные модели прогнозирования распространения нефти и нефтепродуктов										
1	OSRA			+	+	+	+			
2	COZOIL	+	+		+	+			+	+
3	OSIS	+	+	+	+		+		+	+
4	PADM	+	+	+	+		+			
5	OSCAR		+	+					+	
6	OILMAP	+	+				+		+	+
7	ADIOS	+								
8	MOHID	+	+	+	+	+			+	
9	GNOME	+	+	+	+	+	+	+		
10	PHOENICS		+							
11	HyperSuite								+	
12	MEDSLIK	+	+						+	
13	SeaTrackWeb	+		+	+	+	+			+
Российские модели прогнозирования распространения нефти и нефтепродуктов										
1	INMOM									
2	SPILLMOD		+		+	+			+	
3	OilMARS	+			+	+	+		+	
4	FOTS		+	+		+		+	+	
5	ГеоЕСИМО			+				+		

вание эмульсий, дисперсия, оседание), что повышает точность долгосрочных прогнозов. Три из пяти российских моделей (SPILLMOD, FOTS) также учитывают трансформацию, что свидетельствует о понимании ее значимости в российских разработках.

Интегрированы с ГИС семь международных моделей. Это позволяет визуализировать прогноз на электронных картах, накладывать данные о течениях, ветре, рельефе дна и инфраструктуре, что незаменимо для планирования ликвидационных мероприятий (например, OSIS, SeaTrackWeb). Три российские модели также используют ГИС, поскольку интеграция является современным стандартом для инструментов программного анализа.

Моделирование дисперсии в виде отдельных частиц (лагранжев подход) используется в шести международных моделях (OSRA, COZOIL и др.). Этот метод наиболее точен для моделирования адвекции и турбулентной диффузии нефтяного пятна, особенно в условиях сложной динамики вод. Четыре российские модели применяют данный подход (SPILLMOD, OilMARS и др.), что указывает на его широкое признание в прогностическом моделировании разливов.

Учет ледовой обстановки предусмотрен в семи международных моделях, включая GNOME и SeaTrackWeb, что является ключевой функцией для арктических и субарктических регионов, где лед влияет на траекторию разлива и выбор методов ликвидации, и в двух российских моделях (INMOM, OilMARS) заявлены с этой функцией, что логично, учитывая актуальность арктической тематики для России.

Зондирование включает только одна международная модель GNOME, а 3D моделирование толщи воды предусмотрено в семи международных моделях (COZOIL, HyperSuite), что необходимо для прогноза вертикального распределения нефти, особенно при разливах тяжелых нефтепродуктов или в условиях апвеллинга. Поддерживают зондирование две российские модели (FOTS, ГеоЕСИМО), а 3D моделирование реализовано в четырех моделях, что указывает на активное развитие этого направления в российских разработках.

Учет прибрежной зоны предусмотрен в шести международных моделях специализирующихся на прибрежной зоне (COZOIL, OSIS). Они учитывают такие процессы, как вынос нефти на берег, взаимодействие с береговой линией, что критически важно для оценки экологического ущерба. И только одна российская модель

(SPILLMOD) имеет эту функцию, что может указывать на дефицит специализированных инструментов для прогнозирования в сложных береговых условиях.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Исходя из вышесказанного, международные модели отличаются большим разнообразием и, как правило, более широким функционалом. Выделяются комплексные платформы, такие как GNOME, которая охватывает практически все ключевые параметры, включая уникальное зондирование, и SeaTrackWeb, сочетающая лагранжево моделирование, учет типа нефти, льда и прибрежной зоны. Российские модели фокусируются на конкретных, зачастую региональных, задачах. OilMARS явно ориентирована на арктический регион (учет льда, лагранжева модель). FOTS и ГеоЕСИМО делают акцент на оперативном мониторинге и зондировании. Однако в целом наблюдается меньшая комплексность по сравнению с ведущими международными аналогами, особенно в части интеграции ГИС и моделирования прибрежных процессов.

Необходимо разработать концепцию математического моделирования распространения нефтяных загрязнений и аналитическое описание непрерывных и дискретных математических моделей для применения в составе разрабатываемого в рамках проекта прототипа комплекса гибридного моделирования разливов нефтепродуктов в арктических зонах, описывающих протекающие при этом процессы, исходя из предпосылки, что нефтяное пятно рассматривается как сплошная среда. Это позволит с использованием аппарата дифференциальных уравнений в частных производных описать комплекс динамических и физико-химических процессов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Объем перевозок грузов в акватории Северного морского пути – URL: <https://www.fedstat.ru/indicator/51479> (дата обращения: 03.06.2026).
2. Грузооборот трубопроводного транспорта – URL: <https://www.fedstat.ru/indicator/58791> (дата обращения: 03.06.2026).
3. Последствия нефтяного загрязнения для окружающей среды – URL: https://www.ospri.online/site/assets/files/1153/tip13_ru_effectsofpollutionintheenvironment.pdf (дата обращения: 03.06.2026).
4. Аварийные разливы нефти и нефтепродуктов. Ликвидация последствий разливов – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/avariynye-razlivy-nefti-i-nefteproduktov-likvidatsiya-posledstviy-razlivov/viewer> (дата обращения: 15.06.2026).

5. Приказ Ростехнадзора от 19.12.2025 № 448 «Об утверждении Программы профилактики рисков причинения вреда (ущерба) охраняемым законом ценностям при осуществлении федерального государственного надзора в области промышленной безопасности на 2026 год» – URL: https://www.gostechnadzor.ru/energy/energy/%D0%9F%D1%80-448%20%D0%BE%D1%82%2019.12.2025_%D0%9F%D0%91.PDF (дата обращения: 19.06.2026).
6. Анализ рисков разливов нефти – URL: <https://www.boem.gov/environment/oil-spill-modeling/oil-spill-modeling-program> (дата обращения: 19.06.2026).
7. Наука об океане – URL: <https://www.boem.gov/sites/default/files/boem-newsroom/Library/Ocean-Science/Ocean-Science-2014-Oct-Nov-Dec.pdf> (дата обращения: 19.06.2026).
8. Overview of the Oil Spill Risk Analysis (OSRA) Model for Environmental Impact Assessment/*Price James M., Johnson Walter R., Marshall Charles F., Zhen-Gang Ji, Rainey Gail B.*//Spill Science & Technology Bulletin. – 2003. – Vol. 8. – Iss. 5–6. – P. 529–533 – URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1353256103000033> (дата обращения: 19.06.2026).
9. A Coastal zone oil spill model: Development and sensitivity studies Mark Reed a Erich Gundlach. Applied Science Associates, Inc., bE-Tech, Inc., 70, Dean Knauss Drive, Narragansett, Rhode Island 02882, USA & Timothy Kana Coastal Science and Engineering, Inc., PO Box 8056, Columbia, South Carolina 29202, USA (Received 27 October 1988; accepted 6 November 1988).
10. COZOIL – URL: https://www.boem.gov/sites/default/files/boem-newsroom/Library/Publications/1998/98_0014.pdf (дата обращения: 19.06.2026);
11. OIL SPILL MODELLING REPORT – URL: <https://www.energean.com/media/1055/eisa-annex-07-oil-spill-modelling-report.pdf> (дата обращения: 19.06.2026).
12. Marine oil spill information system (OSRIS) – URL: <https://www2.gov.bc.ca/gov/content/environment/air-land-water/spills-environmental-emergencies/planning-prevention-response/partners-in-emergency-prevention/marine-oil-spill-information-system> (дата обращения: 19.06.2026).
13. *Зацепя С. Н.* Прогнозирование распространения нефти и нефтепродуктов в случае аварийного разлива на морских акваториях: научно-методическое пособие/С. Н. Зацепя. – М.: АО «Финпол», 2018. – 140 с. – URL: https://mgmtmo.ru/edumat/monitoring/Forecasting_spread_oil.pdf.
14. *Зацепя С. Н.* Опыт создания оперативных моделей расчета распространения аварийных разливов нефти в Баренцевом море//Арктика: экология и экономика. – 2014. – № 4 (16).
15. Программы для моделирования разливов нефти – URL: <https://project4944606.tilda.ws/page34295848.html> (дата обращения: 21.06.2026);
16. OILMAP – URL: <https://www.rpsgroup.com/services/oceans-and-coastal/modelling/oilmap/#Trajectoryfates> (дата

- обращения: 30.06.2026);
17. Desktop ADIOS – URL: <https://response.restoration.noaa.gov/oil-and-chemical-spills/oil-spills/response-tools/adios.html> (дата обращения: 30.06.2026).
 18. MOHID – Water Modelling System – URL: <https://github.com/Mohid-Water-Modelling-System/Mohid>.
 19. *Mohamad Abed El Rahman Hammoud*. Variance-based sensitivity analysis of oil spill predictions in the Red Sea region/Sec. Marine Pollution, 2023.
 20. *Poojitha D. Yapa*. A Module for NOAA's GNOME Model to Provide Capability to Simulate Deepwater Oil and Gas Spills/The Cooperative Institute for Coastal and Estuarine Environmental Technology, 2003.
 21. Математическое моделирование распространения разлива нефтепродуктов при повреждении нефтепровода в русле реки – URL: https://earchive.tpu.ru/bitstream/11683/57574/1/conference_tpu-2019-C47_V2_p110-114.pdf.
 22. SeaTrackWeb User Guide – URL: <https://stw.smhi.se/stwapp/help/classic/?domain=helcom> (дата обращения: 30.06.2026).
 23. *Дианский Н. А.* Оценка влияния подходного канала к порту Сабетта на изменение гидрологических условий Обской губы с помощью численного моделирования//Арктика: экология и экономика. – 2015. – № 3 (19).
 24. Исследования и разработки, готовые к практическому применению (2021 год) – URL: <https://www.inm.ras.ru/innovations/>.
 25. Прогнозирование распространения нефтяных загрязнений – URL: http://gulfoos.rshu.ru/oilmars_description.php (дата обращения: 23.06.2026).
 26. Система моделирования разливов нефти в ледовитых морях – URL: [https://data.aari.ru/publicat/paa/PAA-77/PAA77-01\(7-16\).pdf](https://data.aari.ru/publicat/paa/PAA-77/PAA77-01(7-16).pdf).
 27. Комплекс расчета перемещения плавающих объектов и нефтяных загрязнений – URL: https://mhi-ras.ru/oil_pollution.html.
 28. Методические рекомендации по прогнозированию распространения нефти и нефтепродуктов в случае аварийного разлива на морских акваториях – URL: <http://www.oceanography.institute/index.php/component/jdownloads/finish/43/1618>.
 29. Использование ГИС-технологий для обеспечения морской деятельности в государственной информационной системе – URL: <https://doicode.ru/doifile/sr/9/sr-10-06-2018-02.pdf> (дата обращения: 23.06.2026). ■

ВВЕДЕНИЕ

При создании сложных технических систем – радиоэлектронной аппаратуры, кораблей, летательных аппаратов, энергетических установок – накапливается большой объем технической документации: протоколы испытаний, акты технических решений, отчеты о дефектах и заключения комиссий. В каждом таком документе фиксируются замечания, отражающие отклонения изделия от установленных требований и ожидаемых характеристик. Согласно ГОСТ Р ИСО 9001–2015, организация должна использовать опыт прошлых несоответствий для предупреждения их повторения в новых проектах [1]. На практике это означает необходимость анализа значительных массивов архивных документов с последующим преобразованием выявленных замечаний в инженерные требования для перспективных разработок. Как показано в работах, посвященных цифровой трансформации проектирования, ключевым драйвером сокращения сроков и повышения качества разработки становится внедрение data-ориентированных подходов, позволяющих перейти к проактивному формированию требований на основании статистики и сути замечаний (несоответствий) [2, 6].

Замечание, как правило, представляет собой короткий текст объемом от одного до трех предложений. Он содержит специальные термины, профессиональные аббревиатуры, сокращенные обозначения оборудования и контекст конкретной проверки, который часто не выражен явно. Формулировки зависят от автора записи, нередко содержат опечатки, неполные грамматические конструкции и неоднородную терминологию. Для практического исполь-

МЕТОДИКА И АЛГОРИТМ КЛАССИФИКАЦИИ ЗАМЕЧАНИЙ К СЛОЖНЫМ ТЕХНИЧЕСКИМ СИСТЕМАМ ДЛЯ ЦИФРОВИЗАЦИИ ИСПЫТАНИЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЭЛЕМЕНТОВ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА

В. В. Ровник, *вед. конструктор отдела автоматики, АО «СПМБМ «Малахит»,
контакт тел. +7 (904) 610 96 95*

зования такого замечания необходимо определить, к какому узлу изделия оно относится, насколько критично по срокам и затратам, распространяется ли на один заказ или на весь класс аналогичных систем и кому именно должно быть направлено для обработки.

В существующей практике эта работа редко выделяется в отдельный формализованный процесс. Элементы классификации распределены между членами комиссии, линейными руководителями и инженерами-исполнителями. Следствием становятся скрытые транзакционные издержки, замедление маршрутизации замечаний и, что особенно критично, потеря части значимых несоответствий, которые позднее проявляются в виде дефектов на последующих стадиях испытаний или эксплуатации. Внедрение цифровой платформы управления испытаниями, агрегирующей все замечания в единой базе, позволяет формализовать этот процесс и превратить результаты испытаний в структурированную базу знаний [3].

Автоматическая категоризация ре-

зультатов испытаний (замечаний) позволяет решать сразу несколько задач: накапливать статистику по типам несоответствий для анализа коренных причин; автоматически направлять замечание ответственному специалисту; ранжировать замечания по важности при планировании корректирующих мероприятий; формировать перечни требований для новых проектов; вести статистику по поставщикам и соисполнителям; снижать нагрузку на инженерный персонал; создавать справочники типовых замечаний для ускорения подготовки документации.

ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМЫ

Традиционные методы машинного обучения в рассматриваемой задаче имеют ряд существенных ограничений [6]. Во-первых, отсутствует репрезентативный размеченный набор данных: архивные замечания ранее не классифицировались в связи с отсутствием справочников и формализованных процессов. Во-вторых, сам состав категорий подвержен эволюции, поэтому регулярное переобучение моделей

становится трудоемким и дорогостоящим. В-третьих, как показала практика применения цифровых инструментов в предметной области, из-за малого объема текстов методы на основе статистики частоты употребления терминов формируют недостаточно информативные признаки, что негативно влияет на качество классификации коротких технических записей [2, 5].

Следовательно, требуется подход, который позволит понимать смысл короткого технического текста, учитывать документный контекст, работать без предварительной обучающей выборки и быстро адаптироваться к изменениям предметного справочника. Таким требованиям в наибольшей степени соответствует использование больших языковых моделей с алгоритмами поиска при малом количестве предварительно размеченных данных [3]. Однако для извлечения максимума информации необходимо реализовать механизм навигации, имитирующий логику эксперта при анализе документа.

ПРЕДЛАГАЕМЫЕ РЕШЕНИЯ

Предлагаемый метод объединяет два ключевых свойства: глубокое понимание контекста, которое обеспечивается большой языковой моделью, и естественную иерархическую структуру протоколов испытаний. В отличие от embedding-подходов, где текст пре-

образуется в числовой вектор и релевантность оценивается косвенно, здесь классификация выполняется через явную навигацию по дереву разделов документа, подобно тому, как действует эксперт-человек при анализе оглавления, подразделов и конкретных пунктов отчета. В основе метода лежит онтология испытаний, позволяющая выстроить иерархию поиска с помощью большой языковой модели [7].

Для каждого протокола испытаний автоматически строится иерархическое дерево. Документ разбивается на структурные блоки: разделы, подразделы, пункты и, при необходимости, абзацы. Границы блоков выделяются по заголовкам, нумерации и формальным признакам структуры, а при их недостаточности – по семантическим разрывам, выявляемым большой языковой моделью. Каждый блок становится узлом дерева.

Для каждого узла формируется краткая аннотация в одно-два предложения, отражающая его содержание. Аннотации родительских узлов строятся рекурсивно на основе аннотаций дочерних узлов, что обеспечивает компактное и управляемое представление всего документа. Аннотация хранится совместно с полным текстом раздела и далее используется как указатель при навигации. Обработка аббревиатур, жаргона и редких обозначений выполняется контекстно, без отдельного словаря. Орфографи-

ческие ошибки на этапе предобработки могут корректироваться средствами внешнего сервиса, что особенно важно для неструктурированного текста, где опечатки способны внести шум в формальную иерархию признаков [5].

При поступлении нового замечания (x) система начинает поиск от корня дерева и на каждом шаге передает большой языковой моделью текущий узел, список дочерних узлов с аннотациями и текст замечания. Из текста протокола испытаний автоматически строится иерархическое дерево разделов, подразделов и пунктов. Каждый узел дерева снабжается краткой аннотацией – одним-двумя предложениями, которые крупная языковая модель формирует на основе полного текста соответствующего фрагмента документа. Аннотации верхних уровней получают рекурсивным обобщением аннотаций дочерних узлов.

Когда поступает новое замечание, система начинает движение от корня дерева и на каждом шаге сравнивает текст замечания с аннотациями всех непосредственных потомков текущего узла. Сравнение выполняет та же языковая модель, которая возвращает не только числовую оценку смысловой близости, но и словесное обоснование своего выбора.

Узел, получивший максимальную оценку, становится следующим шагом навигации. Процесс дословно воспроизводит логику эксперта, просматрива-

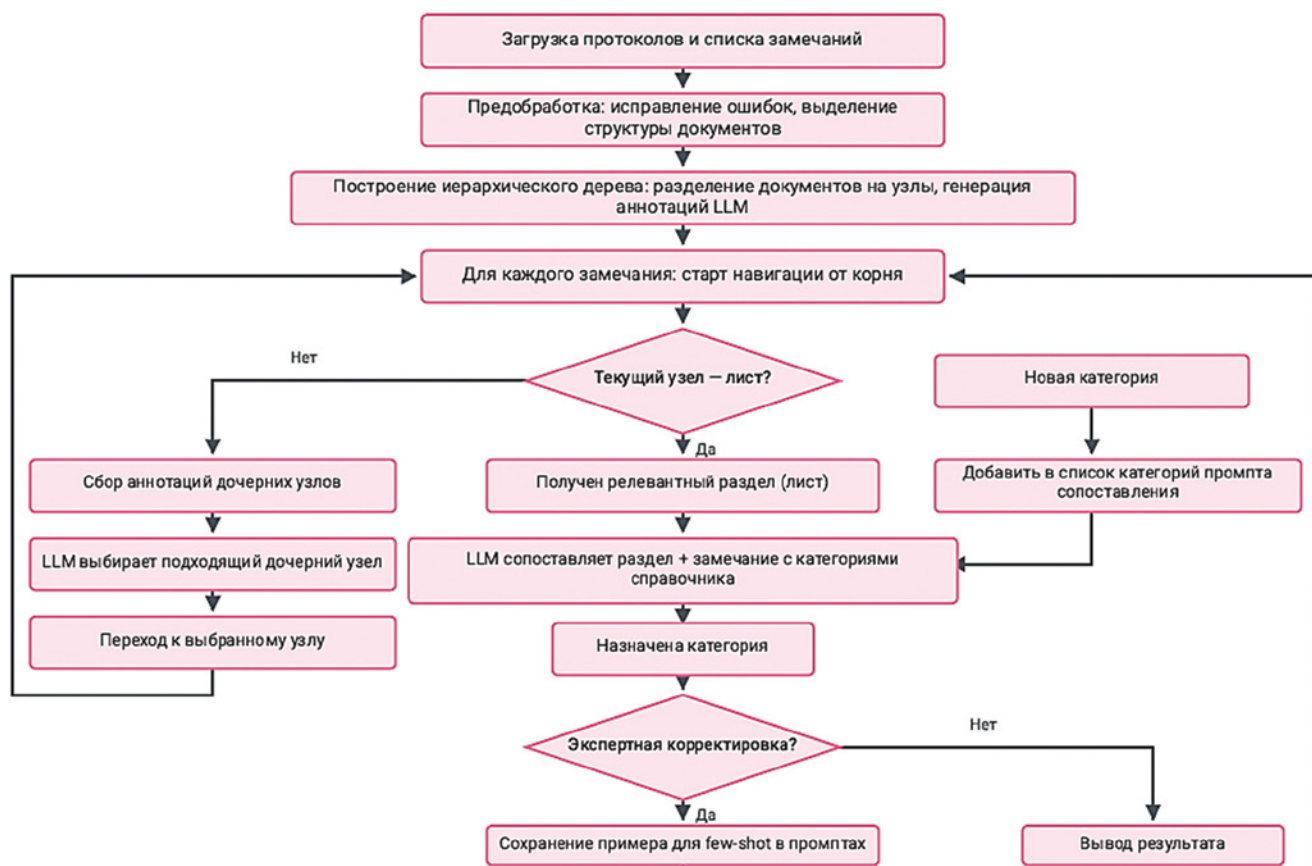


Рис. 1. Общий алгоритм классификации замечаний

ющего оглавление: специалист пробегает заголовки и выбирает тот раздел, который скорее всего содержит обсуждаемую проблему. Если ни один из дочерних узлов не набирает достаточной степени соответствия (ниже заранее заданного порога), спуск останавливается, и контекстным фокусом признается текущий раздел.

На втором этапе языковая модель получает одновременно исходный текст замечания, аннотацию выбранного узла, полный текст этого узла и справочник возможных категорий. Модель сопоставляет замечание, погруженное в восстановленный документный контекст, с описаниями категорий и выбирает наиболее точную, снова сопровождая выбор обоснованием.

Эксперт может в любой момент уточнить поведение системы, задав контекстное правило, например: «Все замечания со словами «отказ поставщика» направлять в категорию брака поставщика». Это правило записывается не в код алгоритма, а в текстовую инструкцию, добавляемую в запрос к языковой модели. Оно начинает действовать немедленно, не требуя перестройки дерева или повторного обучения классификатора. Аналогично при появлении новой категории достаточно пополнить справочник ее названием и описанием, и система учтет ее при следующем же обращении.

Такой механизм обеспечивает контекстно-зависимую классификацию. Например, замечание о скачке напряжения будет отнесено к категории, связанной с отказом системы управления, если оно обнаружено в разделе испытаний этой системы, и к иной категории, если документный контекст указывает на ошибку монтажа или производственный дефект. В этом состоит принципиальное преимущество предлагаемого подхода по сравнению с классификацией только по самому короткому тексту замечания.

Эксперт может оперативно откорректировать решение системы, задав ограничения по связям с изделием, процессом или документом. Такая обратная связь не требует переобучения параметров модели: она включается в промпт большой языковой модели как дополнительный контекст на этапе навигации

или сопоставления со справочником, что согласуется с методами обработки экспертной информации при управлении испытаниями, где конечным критерием качества алгоритма является его согласованность с мнением ведущих специалистов [4]. Например, можно зафиксировать правило, согласно которому замечания с упоминанием конкретного изделия поставщика должны относиться к категории «брак поставщика». После внесения такого контекста уточнение начинает действовать уже при следующих запросах.

При расширении справочника новой категорией перестройки иерархического дерева документа не требуется. Достаточно включить новую категорию и ее текстовое описание в набор эталонов, после чего большой языковой моделью учитываются ее наравне с ранее существовавшими вариантами. Если необходимо, эксперт дополняет описание несколькими примерами применения, что позволяет быстро довести точность отнесения к новой категории до целевого уровня.

Итоговый процесс классификации (рис. 1) включает предобработку текста замечания, навигацию по дереву документа, выбор релевантного листового узла, сопоставление с категориями справочника и возможную экспертную корректировку результата. Такой конвейер обеспечивает прозрачность, масштабируемость и технологическую устойчивость решения при работе с большими архивами протоколов испытаний, что является базовым принципом реализации data-ориентированной методики управления [6].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложенный метод иерархической навигации по документам позволяет решить задачу автоматической категоризации замечаний в условиях, когда отсутствует размеченная обучающая выборка, а сами тексты являются короткими, терминологически насыщенными и контекстно зависимыми. Ключевым результатом является перенос точки принятия решения с изолированного текста замечания на его документное окружение, что существенно повышает содержательную точность классификации.

Практическая ценность подхода состоит в возможности автоматизировать маршрутизацию замечаний, ускорить формирование корректирующих мероприятий, накопить статистику по типам несоответствий и сформировать требования для новых проектов на основе опыта предыдущих испытаний. Метод сохраняет интерпретируемость, допускает точечную экспертную корректировку без переобучения и легко адаптируется к изменению справочника категорий. Это делает его перспективной основой для цифровых инструментов управления испытаниями сложных технических систем, внедрение которых способствует переходу отрасли к принципам цифрового производства [2, 3].

ЛИТЕРАТУРА

1. ГОСТ Р ИСО 9001–2015. Системы менеджмента качества. Требования.
2. Перспективные направления совершенствования разработки сложных технических систем за счет внедрения цифровых технологий / *Кириянов А. В., Дубинин А. В., Никифоров С. А., Ровник В. В., Саитов И. П., Сальцберг А. В.* // Морская радиоэлектроника. – 2024. – № 4 (90). – С. 18–21.
3. *Ровник В. В., Саитов И. П., Никифоров С. А.* Оптимизация объектовых испытаний на основе внедрения цифровой платформы управления испытаниями кораблей // Морская радиоэлектроника. – 2021. – № 3 (77). – С. 34–37.
4. *Павлов А. Н., Соколов Б. В.* Методы обработки экспертной информации: Учебно-методическое пособие. – СПб.: ГУАП. – 2005
5. *Дударин П. В., Ярушкина Н. Г.* Подход к трансформации кластерного дерева признаков в векторное пространство признаков // Радиотехника. – 2018. – № 6.
6. *Дударин П. В., Ярушкина Н. Г.* Алгоритм построения иерархического классификатора коротких текстовых фрагментов на основе кластеризации нечеткого графа // Радиотехника. – 2017. – № 6.
7. Принципы реализации методики управления испытаниями сложных технических систем, основанная на data-ориентированном подходе с использованием цифровых инструментов / *Ровник В. В., Саитов И. П., Кириянов А. В., Гейко С. А., Самычко Ю. С.* // Морская радиоэлектроника. – 2026. – № 1 (95). – С. 18–23. ■

При работе управляемыми средствами (УС) по морскому групповому объекту (МГО) бортовые РЛС (БРЛС) УС выполняют обнаружение объектов назначения (ОН) МГО и обеспечивают преимущественное приведение УС к наиболее приоритетным ОН.

Обнаружение МГО, как правило, осуществляется в условиях постановки дезинформирующих ложных объектов типа уголкового отражателя (УО) и облаков дипольных отражателей (ОДО). В этом случае одной из приоритетных задач, решаемых БРЛС УС, становится селекция истинных объектов (ОН) от ложных объектов указанного типа.

Потенциальный уровень эффективности селекции ОН от ложных объектов достигается в тех случаях, когда имеется полная информация о распределении используемого отличительного признака (ОП) для объектов разных классов и априорных вероятностях классов. Во многих случаях имеется только определенный тип априорной информации о числовых характеристиках ОП, например математических ожиданиях, дисперсиях и др. Такая информация определяет отношение порядка между одноименными числовыми характеристиками ОП объектов разных классов, а сами характеристики при этом неизвестны.

В настоящей статье применительно к различным уровням информационной обеспеченности (априорной неопределенности) исследуются решающие правила селекции ОН от ОДО. Эти правила построены на основе упорядочения обнаруженных объектов по их ОП – «число обнаружений» и «выборочная дисперсия интенсивности эхосигналов».

СЕЛЕКЦИЯ ОН ОТ ОДО НА ОСНОВЕ УПОРЯДОЧЕНИЯ ОБЪЕКТОВ ПО ЧИСЛУ ИХ ОБНАРУЖЕНИЙ

Общая характеристика ОП, используемого для селекции. Основным информационным признаком ОН, на использовании которого построены активные системы локации большинства УС, считается заметность ОН в различных частотных диапазонах электромагнитных волн (ЭМВ), и одной из основных характеристик радиолокационного (РЛ) рассеяния ОН является его эффективная поверхность рассеяния (ЭПР).

К настоящему времени уже достаточно подробно исследованы ЭПР разных классов кораблей иностранных государств [1]. ЭПР корабля в основном определяется его геометрическими размерами, высотой и протяженностью бортов и в меньшей степени зависит от поляризации и длины волны облучающего поля.

При обобщении результатов натурных измерений ЭПР кораблей ВМС США [2] получена эмпирическая фор-

РАЗЛИЧИЕ ИСТИННЫХ И ЛОЖНЫХ ЦЕЛЕЙ НА ОСНОВЕ ИХ УПОРЯДОЧЕНИЯ ПО ОТЛИЧИТЕЛЬНОМУ ПРИЗНАКУ

О.Г. Мальцев, д-р техн. наук, начальник НИЛ,
АО «Концерн «Гранит-Электрон»,
контакт. тел. (812) 271 4585, 271 6774

мула, устанавливающая зависимость между медианой $\hat{s}$ (м²) ЭПР корабля, его водоизмещением D (тыс. т) и частотой f (МГц) облучающего поля:

$$\hat{s} = 52\sqrt{fD^3}. \quad (1)$$

Формула (1) справедлива при скольжении облучения в X (8...12 ГГц), S (2...4 ГГц) и L (1...2 ГГц) диапазонах ЭМВ для кораблей водоизмещением от 2000 до 17 000 т.

Уменьшение ЭПР ОН является одним из важных направлений борьбы с БРЛС УС. Это обусловлено не только уменьшением дальности действия БРЛС, но и возможностью пропорционального уменьшения потребного количества ОДО.

Технология Stealth, разрабатываемая первоначально только для создания «невидимого» самолета, получила широкое распространение и для снижения РЛ заметности корабля [3]. Метод уменьшения величины ЭПР корабля по программе Stealth реализуется путем придания корабельным конструкциям малоотражающих форм, исключающих наличие «блестящих точек», которые образуются стыками, острыми кромками, УО, большими участками малой кривизны (архитектурные решения), а также применением малоотражающих композиционных материалов и радиопоглощающих покрытий (РПП).

Существенным недостатком РПП является их узкополосность. Поэтому многочастотные сигналы и широкополосные сигналы с базой $B = 10^3 \dots 10^7$ (в работе [4] сигналы с такой базой названы шумоподобными) могут применяться в РЛС для повышения качества обнаружения РЛ объектов с РПП.

Решающие правила селекции. Как известно, процедура принятия решения об обнаружении объекта может быть существенно сокращена путем устранения медленных замираний (уменьшением времени корреляции отраженных сигналов), что достигается либо введением быстрой перестройки частоты в достаточно широком диапазоне, либо применением многоканальных БРЛС. Под многоканальной понимается находящаяся на УС БРЛС, работающая одновременно на нескольких разнесенных частотных литерах

и производящая некоррелированное между отдельными каналами обнаружение ОН МГО.

К многоканальным может быть отнесена и многопозиционная РЛ система, образованная информационно связанными (посредством радиоканалов) БРЛС отдельных УС при координированном групповом полете. Далее рассматривается такая многоканальная БРЛС, применение которой открывает некоторые возможности и для селекции ОН от ОДО за счет обобщения и статистической обработки некоррелированной информации, поступающей от БРЛС отдельных УС.

При построении решающих правил селекции постулируется выполнение условия, что ОН по сравнению с ОДО имеют большую ЭПР и что используется статистика (ОП) «число обнаружений», выбор которой обосновывается следующими соображениями.

Вследствие предполагаемых различий средних значений ЭПР ОН и ОДО в некотором диапазоне условий наблюдения при подобранных соответствующим образом порогах обнаружения будет иметь место разница в вероятностях правильного обнаружения объектов, различающихся между собой средними значениями ЭПР, т. е. ОН и ОДО в этих условиях будут «статистически контрастными». Тогда вероятность правильного обнаружения ОН БРЛС УС будет больше (вследствие большей ЭПР) вероятности правильного обнаружения ОДО.

Объединим информацию о фактах обнаружения ОН и ОДО БРЛС отдельных УС и выполним подсчет для каждого j -го объекта число УС m_j , БРЛС которых обнаружен этот объект. Тогда при достаточно большом числе n УС можно ожидать, что отношения m_j/n будут близки к вероятностям правильного обнаружения соответствующих объектов и, следовательно, объекты с большей ЭПР (ОН) будут обнаруживаться чаще, чем объекты с меньшей ЭПР (ОДО).

Числа m_j упорядочивают, т. е. располагают в виде убывающего ряда

$$m_{j_1} \geq m_{j_2} \geq \dots \geq m_{j_s}, \quad (2)$$

где m_{j_i} – число обнаружений j_i -го ($i = 1, 2, \dots, s$) объекта n -канальной БРЛС; s – число обнаруженных объектов; $m_{j_1}, m_{j_2}, \dots, m_{j_s}$ – порядковые ста-

истики, а $(m_{j_1}, m_{j_2}, \dots, m_{j_s})$ – вариационный ряд.

Используя ряд (2), проведем селекцию ОН от ОДО, отбрасывая объекты, которые соответствуют последним членам этого ряда, и рассмотрим три решающих правила селекции, которые учитывают наличие и состав априорной информации или ее отсутствие.

Решающее правило I. Предполагается, что из общего числа обнаруженных объектов известно число ОН $s_{\text{он}}$. Тогда решающее правило селекции может быть построено следующим образом: объекты, соответствующие $s_{\text{он}}$ первым элементам ряда (2), отнесем к ОН, а остальные объекты – к ОДО, и они исключаются из дальнейшей обработки.

Возможна модификация решающего правила I. Но прежде чем к ней приступить, рассмотрим частный случай: в группе обнаруженных объектов один ОН и, следовательно, $s_{\text{одо}} = s - 1$.

Известны также вероятности правильного обнаружения ОН $p_{\text{он}}$ и ОДО $p_{\text{одо}}$ БРЛС отдельного УС.

Тогда вероятность события, заключающегося в том, что если ОН обнаружен m раз, то все ОДО будут обнаружены менее чем m раз, т. е. вероятность нахождения ОН по числу обнаружений на первом месте ряда (2) равна

$$P = \sum_{m=1}^n \left[A_m \left(\sum_{k=0}^{m-1} B_k \right)^{s_{\text{одо}}} \right],$$

где $A_m = C_n^m p_{\text{он}}^m (1 - p_{\text{он}})^{n-m}$;

$B_k = C_n^k p_{\text{одо}}^k (1 - p_{\text{одо}})^{n-k}$; C_n^m – число сочетаний из n элементов по m ; n – число УС.

Если при решении задачи селекции не указывать на один из объектов как ОН, а ограничиться утверждением, что он находится в числе нескольких первых объектов из ряда (2), то вероятность такого события может быть определена как

$$P_R = \sum_{m=1}^n A_m \left[\sum_{r=0}^R C_{s_{\text{одо}}}^r T_m^r (1 - T_m)^{s_{\text{одо}}-r} \right],$$

где $T_m = \sum_{k=m}^n B_k$; R – число ОДО, которые обнаружены не меньше число раз, чем ОН; и как показывают результаты расчетов, эта вероятность существенно возрастает даже при плохой «статистической контрастности».

Учитывая результаты рассмотренного частного случая, решающее правило I может быть модифицировано следующим образом: для дальнейшей обработки отбираем объекты, соответствующие $s_{\text{он}} + R$, $R > 0$ первым элементам ряда (2).

Решающее правило II. Считаются известными число n УС и вероятности правильного обнаружения ОН $p_{\text{он}}$ и ОДО $p_{\text{одо}}$ БРЛС отдельного УС. При таких исходных данных может быть решена

задача оптимизации решающего правила селекции при критериальной обработке, которая формулируется следующим образом: требуется найти оптимальный цифровой порог селекции $m_{\text{пор}}^*$, который при вероятности ложной селекции ОН (принятия ОН за ОДО) не хуже заданной величины, т. е. при $P_F^* \leq P_{\text{зад}}$, обеспечивает максимум вероятности правильной селекции ОДО (принятия ОДО за ложный объект):

$$P_D^* = \max_{m_{\text{пор}}} \{P_D(m_{\text{пор}})\},$$

где $m_{\text{пор}}$ – пороговое число обнаружений, а знаком «*» помечается искомое оптимальное решение.

Вероятности правильной селекции ОДО P_D и ложной селекции ОН P_F рассчитываются следующим образом:

$$P_D = \sum_{m=0}^{m_{\text{пор}}-1} C_n^m p_{\text{одо}}^m (1 - p_{\text{одо}})^{n-m};$$

$$P_F = \sum_{m=0}^{m_{\text{пор}}-1} C_n^m p_{\text{он}}^m (1 - p_{\text{он}})^{n-m}.$$

Объекты, которые соответствуют первым элементам ряда (2) и для которых число их обнаружений превышает порог $m_{\text{пор}}^*$, принимаем за ОН, а остальные объекты – за ОДО.

Решающее правило III. Наличие априорной информации о числе ОН в группе обнаруженных объектов и о значениях вероятностей правильного обнаружения ОН и ОДО представляется проблематичным. Поэтому при отсутствии априорной информации такого рода может оказаться целесообразным пользоваться конкретными результатами обнаружения, учитывая, что $p_{\text{он}} > p_{\text{одо}}$. Рассмотрим следующую процедуру селекции ОН от ОДО.

Определим среднее число объектов

$$s_{\text{ср.}} = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^s m_j,$$

обнаруженных БРЛС одного УС, округлив его до целого числа $\bar{s}_{\text{ср.}}$ и найдем в ряду (2) число $m_{\text{ср.}}$ того объекта, порядковый номер которого равен $\bar{s}_{\text{ср.}}$. Далее произведем селекцию по критерию

$$\ll k \text{ из } n \gg \text{ при } k = m_{\text{ср.}} + 1, \quad (3)$$

т. е. отбросим те объекты, которые были обнаружены $m_{\text{ср.}}$ раз и менее.

Отметим, что порог k определяется по этой процедуре не априорно, а лишь после объединения информации отдельных УС. Величина k в этом случае зависит от значения вероятностей $p_{\text{он}}$, $p_{\text{одо}}$ и числа ОН и ОДО в момент обнаружения.

Дополнительно приведем решающее правило селекции, основанное на предельном распределении статистики [5]. Пусть m_1 и m_2 – независимые дискретные случайные величины, имеющие биномиальные распределения $\text{Bi}(n_1, p_1)$ и $\text{Bi}(n_2, p_2)$, и требуется проверить ос-

новную гипотезу $H_0: p_1 = p_2$, с которой конкурирует другая гипотеза $H_1: p_1 > p_2$.

Отношение правдоподобия для основной гипотезы

$$\lambda = \left(\frac{m}{n} \right)^m \left(1 - \frac{m}{n} \right)^{n-m} \left(\frac{m_1}{n_1} \right)^{-m_1} \left(\frac{m_2}{n_2} \right)^{-m_2} \rightarrow \rightarrow \left(1 - \frac{m_1}{n_1} \right)^{-n_1+m_1} \left(1 - \frac{m_2}{n_2} \right)^{-n_2+m_2},$$

где $m = m_1 + m_2$; $n = n_1 + n_2$.

Предельное распределение $-2 \log \lambda$ при $n_1, n_2 \rightarrow \infty$ есть распределение χ^2 с одной степенью свободы $C(1)$, когда основная гипотеза верна. Следовательно, гипотезу о равенстве p_1 и p_2 следует отвергнуть, если выполняется условие

$$-2 \log \lambda > \chi_{1,\alpha}^2, \quad (4)$$

где $\chi_{1,\alpha}^2$ – α -процентная точка распределения χ^2 с одной степенью свободы (величину α называют уровнем значимости критерия).

Если же условие (4) не выполняется, то результаты измерений считают непротиворечащими основной гипотезе и, следовательно, она принимается.

Таким образом, вероятность ошибочно отвергнуть гипотезу $H_0: p_1 = p_2$, когда она верна, приближенно равна $\alpha/100$, или, точнее,

$$P\{-2 \log \lambda > \chi_{1,\alpha}^2 \mid p_1 = p_2\} \rightarrow \frac{\alpha}{100},$$

$$n_1, n_2 \rightarrow \infty.$$

Учитывая, что ряд (2) является убывающим, решающее правило селекции можно представить следующим образом: последовательно увеличивая i , $i = 1, 2, \dots, s-1$, осуществлять контроль за выполнением условия $-2 \log \lambda_i > \chi_{1,\alpha}^2$, при выполнении которого (например, при $i = i^*$) объекты, соответствующие i^* первым элементам ряда (2), т. е. принадлежащие множеству $\{j_1, j_2, \dots, j_{i^*}\}$, следует отнести к ОН, остальные – к ОДО. Здесь

$$\lambda_i = \left(\frac{m_i}{n_i} \right)^{m_i} \left(1 - \frac{m_i}{n_i} \right)^{n_i-m_i} \left(\frac{m_{j_1}}{n_{j_1}} \right)^{-m_{j_1}} \left(\frac{m_{j_{i+1}}}{n_{j_{i+1}}} \right)^{-m_{j_{i+1}}} \rightarrow \rightarrow \left(1 - \frac{m_{j_1}}{n_{j_1}} \right)^{-n_{j_1}+m_{j_1}} \left(1 - \frac{m_{j_{i+1}}}{n_{j_{i+1}}} \right)^{-n_{j_{i+1}}+m_{j_{i+1}}},$$

где $m_i = m_{j_i} + m_{j_{i+1}}$; $n_i = n_{j_i} + n_{j_{i+1}}$.

Результаты расчетов. Оценка решающих правил селекции осуществлялась методом статистических испытаний на ПЭВМ по двум критериям – полноте и точности отображения МГО, характеризующим соответственно эффективность и качество решающих правил. Полнота $k_{\text{п.о.}}$ и точность $k_{\text{т.о.}}$ отображения МГО определены как относительное число соответственно ОН и ОДО, оставшихся по завершении процедуры селекции.

В качестве исходных данных были выбраны:

Решающее правило		«Статистическая контрастность»					
		хорошая ($p_{он} = 0,9; p_{одо} = 0,2$)			плохая ($p_{он} = 0,8; p_{одо} = 0,6$)		
		Порог селекции	$k_{п.о.}$	$k_{т.о.}$	Порог селекции	$k_{п.о.}$	$k_{т.о.}$
I	$R = 0$	–	1	0	–	0,72	0,20
	$R = 1$	–	1	0,1	–	0,76	0,27
	$R = 2$	–	1	0,2	–	0,82	0,33
II	$P_{ф.ад.} = 0,1$	6	≈ 1	≈ 0	5	0,94	0,60
III		4*	≈ 1	≈ 0	6*	0,76	0,30
		3	1	0,26	5	0,95	0,64

Примечание: 4*, 6* – пороги селекции, рассчитанные по критерию (3).

- 8-канальная БРЛС (число УС $n = 8$);
- число ОН в МГО $s_{он} = 7$;
- число ОДО $s_{одо} = 10$;
- «статистическая контрастность» – хорошая ($p_{он} = 0,9; p_{одо} = 0,2$) и плохая ($p_{он} = 0,8; p_{одо} = 0,6$);
- оптимизация порога селекции в решающем правиле II выполнялась при $P_{ф.ад.} = 0,1$.

Результаты расчетов $k_{п.о.}$ и $k_{т.о.}$, усредненные по числу статистических испытаний, приведены в табл. 1.

Анализ данных табл. 1 позволяет сформулировать следующие выводы.

1. При хорошей «статистической контрастности»:

- все три решающих правила (если решающее правило I не модифицировано, т. е. $R = 0$, а в решающем правиле III используется расчетное значение порога селекции) обеспечивают максимально возможную ($k_{п.о.} = 1$) или близкую к ней эффективность и максимально возможное ($k_{т.о.} = 0$) или близкое к нему качество отображения МГО;
- модификация решающего правила I (при $R > 0$) и уменьшение порога селекции относительно расчетного значения для решающего правила III нецелесообразны, поскольку приводят к снижению точности (росту $k_{т.о.}$).

2. При плохой «статистической контрастности»:

- решающее правило I по критерию $k_{п.о.}$ уступает двум остальным, даже при его модификации (при $R > 0$), приводящей к росту $k_{т.о.}$;
- решающее правило II и решающее правило III (при снижении порога селекции относительно расчетного значения) обеспечивают примерно одинаковые как эффективность, так и качество отображения МГО;
- для решающего правила III рост $k_{п.о.}$ за счет снижения порога селекции относительно расчетного значения приводит к росту $k_{т.о.}$ (снижению точности).

С развитием теории и техники радиоэлектронного противодействия ЭПР как

ОП может оказаться малоинформативным. Необходимо использовать объективные различия ОН и ОДО – различия в эхосигналах, обусловленные различием в физической структуре ОН и ОДО и мало зависящие от мер по организации постановки ложных объектов. Методы селекции на основе таких различий требуют анализа тонкой структуры эхосигналов и выделения сигнатур (характерных признаков), например длительности эхосигналов, частотного спектра, амплитудных и угловых флуктуаций, устойчивости по времени выбросов сигналов от отдельных «блестящих точек».

СЕЛЕКЦИЯ ОН ОТ ОДО НА ОСНОВЕ УПОРЯДОЧЕНИЯ ОБНАРУЖЕННЫХ ОБЪЕКТОВ ПО ВЫБОРОЧНОЙ ДИСПЕРСИИ ИНТЕНСИВНОСТИ ЭХОСИГНАЛОВ

Общая характеристика ОП, используемого для селекции. Рассмотрение множества информативных признаков показывает, что в настоящее время (с учетом возможностей современных БРЛС УС) в качестве устойчивого информативного признака для решения задачи селекции ОН от ОДО выбираются спектрально-корреляционные характеристики межпериодных флуктуаций эхосигналов, такие как ширина спектральной плотности межпериодных флуктуаций и время их корреляции.

Флуктуации амплитуды отраженного сигнала обусловлены интерференцией составляющих сигнала, отраженных от различных частей объекта. Значения ширины $\Delta f_{0,1}$ (на уровне «–10 дБ») спектральной плотности межпериодных флуктуаций огибающей эхосигналов от ОН и ОДО, полученные с использованием РЛС, работающей на одной несущей частоте, составляют:

$$\Delta f_{0,1}^{(он)} = 2...30 \text{ Гц} \quad \text{– для ОН [6];}$$

$$\Delta f_{0,1}^{(одо)} = 33...130 \text{ Гц} \quad \text{– для ОДО [7].}$$

Указанные различия в значениях ширины спектральной плотности межпериодных флуктуаций огибающей эхосигналов от различных объектов обусловлены существенными отличиями физической природы ОН и ОДО.

При наблюдении огибающей эхосигнала в течение приблизительно 1 с ее можно считать стационарным в широком смысле случайным процессом, т. е. процессом с постоянным, не зависящим от времени математическим ожиданием и корреляционной функцией $K(t_1, t_2)$, зависящей только от разности аргументов t_1 и t_2 .

Известно [8] также, что корреляционная функция и спектральная плотность стационарного в широком смысле случайного процесса обладают всеми свойствами, характерными для пары взаимных преобразований Фурье. В частности, чем «шире» спектр, тем «уже» корреляционная функция, и наоборот. Этот результат количественно выражается в виде принципа (или соотношения) неопределенности.

Используя этот принцип, можно для указанных выше значений ширины $\Delta f_{0,1}$ спектра определить и соответствующие значения времен корреляции. Принимая [6] для ОН экспоненциальный вид корреляционной функции межпериодных флуктуаций огибающей отраженных от него сигналов, получим следующее соотношение неопределенности:

$$\Delta f_{0,1} \tau_{0,5} = \frac{\sqrt{21} \ln 2}{2\pi} \approx 0,5,$$

где $\tau_{0,5}$ – время корреляции межпериодных флуктуаций огибающей эхосигналов на уровне «0,5».

Откуда для ОН $\tau_{0,5}^{(он)} = 17...250 \text{ мс}$.

Аналогичное соотношение неопределенности для ОДО при аппроксимации корреляционной функции межпериодных флуктуаций огибающей эхосигналов от него гауссовской кривой имеет следующий вид:

$$\Delta f_{0,1} \tau_{0,5} = \sqrt{\frac{\ln 10}{\pi}} \approx 0,85,$$

откуда для ОДО $\tau_{0,5}^{(одо)} = 6...25 \text{ мс}$.

Поскольку для распознавания сигналов пользоваться их спектральным представлением значительно проще, чем корреляционным, то в качестве исходного описания рационально использовать энергетический спектр межпериодных флуктуаций эхосигналов. При ограниченном времени наблюдения используются различные методы спектрального оценивания, которое осуществляется в процессе выполнения специального режима подопроверждения каждого из обнаруженных объектов, что, естественно, увеличивает время принятия решения.

Во многих важных для практики случаях необходимо решать задачу селекции одновременно с обнаружением объектов, которое выполняется часто на предельных дальностях и в условиях, когда время, отведенное на обнаружение, ограничено. В связи с этим представляется целесообразным использо-

вать для селекции информацию, которая может быть получена одновременно с обнаружением объекта по пачке эхосигналов при работе БРЛС без перестройки несущей частоты.

Простой в аппаратной реализации путь выявления различий межпериодных флуктуаций огибающей эхосигналов от ОН и ОДО состоит в использовании интенсивности пачки эхосигналов [9].

Приведем следующие соображения, по которым представляется, что интенсивность эхосигналов от ОН и ОДО характеризует различия их спектрально-корреляционных характеристик. При сканировании пространства БРЛС в процессе обнаружения на одной несущей частоте время корреляции флуктуаций огибающей эхосигналов при наблюдении ОН соизмеримо с длительностью пачки импульсов («дружно» флуктуирующая пачка), а при наблюдении ОДО – значительно меньше длительности пачки импульсов («быстро» флуктуирующая пачка). Учитывая это, можно предположить, что интенсивность эхосигналов (и ее оценка, например ширина пачки импульсов) от обзора к обзору для ОН будет иметь более глубокие флуктуации (большую дисперсию), чем для ОДО.

Отметим также, что если БРЛС работает с межпериодной перестройкой несущей частоты, то возможно проведение селекции ОН от УО, поскольку в этом случае флуктуации огибающей эхосигналов от ОН становятся быстрыми, а от УО – остаются медленными.

Результаты моделирования подтвердили, что существуют различия в значениях дисперсии интенсивности эхосигналов от ОН и ОДО (при работе БРЛС без перестройки несущей частоты). Следовательно, имеется принципиальная возможность селекции ОН от ОДО БРЛС, в которой реализован принцип объединения РЛ информации, полученной за несколько обзоров, по величине выборочной дисперсии интенсивности эхосигналов.

На рис. 1 представлены кривые, изображающие зависимость дисперсии

($\sigma_{\text{он}}^2$, $\sigma_{\text{одо}}^2$ – при наблюдении соответственно ОН и ОДО) интенсивности эхосигналов от отношения ρ сигнал/шум после сжатия фазоманипулированного сигнала. Параметром кривых является время корреляции межпериодных флуктуаций огибающей эхосигналов, значения которого при наблюдении ОН принимались равными $\tau_{0,5}^{(\text{он})} = 100$ и 50 мс (кривые 1 и 2 соответственно), а при наблюдении ОДО – $\tau_{0,5}^{(\text{одо})} = 20$ и 10 мс (кривые 3 и 4 соответственно).

Решающие правила селекции. Примем, что по результатам измерения интенсивности эхосигналов от объектов, осуществляемого в процессе их обнаружения на каждом обзоре, для каждого j -го, $j=1, 2, \dots, s$ из обнаруженных объектов определяется оценка $\hat{\sigma}_j^2$, ее дисперсии (выборочная дисперсия интенсивности). Оценки дисперсий по всем s объектам образуют выборку ($\hat{\sigma}_1^2, \hat{\sigma}_2^2, \dots, \hat{\sigma}_j^2, \dots, \hat{\sigma}_s^2$), которая представляет собой смесь, элементы которой могут принадлежать одному из двух классов – классу ОН или классу ОДО. Полагаем, что различия дисперсий интенсивности для объектов разных классов существенно больше, чем для объектов, принадлежащих одному классу.

Упорядочим объекты по убыванию величины выборочной дисперсии интенсивности эхосигналов. В результате получим убывающий ряд

$$\hat{\sigma}_{j_1}^2 \geq \hat{\sigma}_{j_2}^2 \geq \dots \geq \hat{\sigma}_{j_s}^2, \quad (5)$$

где s – число обнаруженных объектов; $\hat{\sigma}_{j_1}^2, \hat{\sigma}_{j_2}^2, \dots, \hat{\sigma}_{j_s}^2$ – порядковые статистики, а $(\hat{\sigma}_{j_1}^2, \hat{\sigma}_{j_2}^2, \dots, \hat{\sigma}_{j_s}^2)$ – вариационный ряд.

Используя ряд (5), проведем селекцию ОН от ОДО, отбрасывая объекты, которые соответствуют последним членам этого ряда. С учетом наличия и состава априорной информации или ее отсутствия осуществим селекцию тремя различными решающими правилами.

Решающее правило I. Предполагается, что из общего числа обнаруженных объектов известно число ОН $s_{\text{он}}$. Тогда решающее правило селекции может быть построено следующим образом: объекты, соответствующие $s_{\text{нк}}$ пер-

вым элементам ряда (5), отнесем к ОН, а остальные объекты – к ОДО, и они исключаются из дальнейшей обработки.

Возможна модификация решающего правила I, заключающаяся в отборе для дальнейшей обработки объектов, соответствующих $s_{\text{он}} + R$, $R > 0$ первым элементам ряда (5).

Так же как и для ОП «число обнаружений», рассмотрим здесь частный случай, когда в группе обнаруженных объектов один ОН и, следовательно, $s_{\text{одо}} = s - 1$ ОДО. Считаются известными также плотности вероятностей выборочных дисперсий интенсивности эхосигналов от ОН $w_{\text{он}}(\hat{\sigma}^2)$ и ОДО $w_{\text{одо}}(\hat{\sigma}^2)$.

Тогда вероятность того, что величина $\hat{\sigma}^2$ для ОН примет значение большее, чем для всех ОДО, будет равна

$$P = \int_{-\infty}^{+\infty} w_{\text{он}}(\hat{\sigma}^2) \left[\int_{-\infty}^{\hat{\sigma}^2} w_{\text{одо}}(t) dt \right]^{s_{\text{одо}}} d\hat{\sigma}^2,$$

а вероятность того, что имеется не более R ОДО, для которых величина $\hat{\sigma}^2$ оказалась не меньшей, чем для ОН, может быть определена по формуле

$$P_R = \int_{-\infty}^{+\infty} w_{\text{он}}(\hat{\sigma}^2) \left[\sum_{r=0}^R \binom{s_{\text{одо}}}{r} T_{\hat{\sigma}^2}^r (1 - T_{\hat{\sigma}^2})^{s_{\text{одо}}-r} \right] d\hat{\sigma}^2, \quad (6)$$

где $T_{\hat{\sigma}^2} = \int_{-\infty}^{\hat{\sigma}^2} w_{\text{одо}}(t) dt$.

Для нахождения плотности вероятности $w(\hat{\sigma}^2)$ используем выражение для плотности вероятности стандарта σ' случайной выборки [10]

$$w(\sigma') = c_1 (\sigma')^{\kappa-2} \exp \left\{ -\frac{\kappa}{2\sigma^2} (\sigma')^2 \right\},$$

где $c_1 = \frac{\kappa^{(\kappa-1)/2}}{2^{(\kappa-3)/2} \Gamma[(\kappa-1)/2] \sigma^{\kappa-1}}$; $\Gamma[x]$ – гамма-функция; σ^2 – дисперсия нормальной генеральной совокупности; κ – размер выборки.

Выборочная дисперсия $\hat{\sigma}^2$ и стандарт σ' связаны функциональной зависимостью $\hat{\sigma}^2 = (\sigma')^2 \kappa / (\kappa - 1)$. Поскольку обратная функция двузначна, т. е. $\sigma'_1 = -\sqrt{\hat{\sigma}^2 (\kappa - 1) / \kappa}$, $\sigma'_2 = \sqrt{\hat{\sigma}^2 (\kappa - 1) / \kappa}$, то

для определения закона распределения случайной величины $\hat{\sigma}^2$ следует использовать общую формулу [11]. С учетом того, что производная от $\sqrt{\hat{\sigma}^2 (\kappa - 1) / \kappa}$ по $\hat{\sigma}^2$ равна $0,5\sqrt{(\kappa - 1) / (\kappa \hat{\sigma}^2)}$, после соответствующих преобразований получим

$$w(\hat{\sigma}^2) = c_1 c_2 (\hat{\sigma}^2)^{(\kappa-3)/2} \exp \left\{ -\frac{\kappa-1}{2\sigma^2} \hat{\sigma}^2 \right\},$$

где $c_2 = [(\kappa - 1) / \kappa]^{(\kappa-1)/2}$; $\kappa = 2k$, $k = 2, 3, 4, \dots$.

Расчеты вероятностей P_R , $R=1, 2, \dots$ по формуле (6) после подстановки выражений $w(\hat{\sigma}^2)$ с индексами «он» и «одо» могут быть использованы для обоснования целесообразности модификации решающего правила I.

Решающее правило II. При условии, что имеется полная априорная

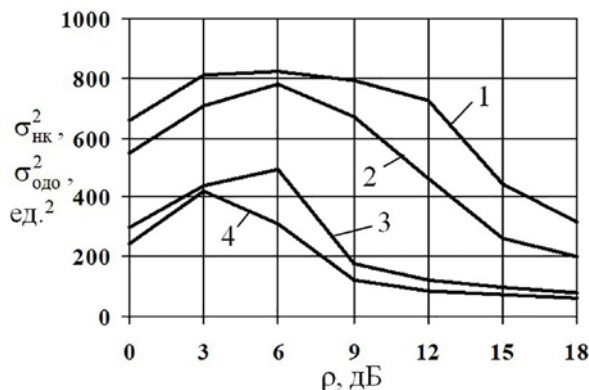


Рис. 1. Кривые зависимости дисперсии интенсивности эхосигналов от отношения сигнал/шум

информация о законах распределения характеристик экосигналов в классах и априорных вероятностях классов, оптимальный по критерию Неймана–Пирсона алгоритм селекции ОН от ОДО имеет вид [9]

$$\frac{H_{\text{он}}}{H_{\text{одо}}} > \frac{2\sigma_{\text{он}}^2}{\kappa-1} \left[\frac{P_F \Gamma\left(\frac{\kappa+1}{2}\right)}{\Gamma\left(\frac{\kappa}{2}\right)} \right]^{\frac{2}{\kappa-1}}, \quad (7)$$

где $H_{\text{он}}$ ($H_{\text{одо}}$) – решение (гипотеза) о том, что анализируемая выборка замеров интенсивности экосигналов получена от ОН (ОДО); $\sigma_{\text{он}}^2$ – дисперсия интенсивности экосигналов от ОН; κ – размер выборки (число обнаружений объекта); P_F – условная вероятность ложной селекции ОН (отношения ОН к ОДО); $\Gamma(x)$ – гамма-функция.

Согласно алгоритму (7) для принятия решения о принадлежности объекта к одному из двух типов (ОН или ОДО) необходимо выборочную дисперсию интенсивности экосигналов от этого объекта сравнить с установленным порогом в масштабе дисперсии интенсивности экосигналов от ОН. Объект относится к ОН, если значение полученной статистики не меньше установленного порога.

Если решение принимается при наблюдении ОН, то алгоритм селекции (7) состоит в сравнении выборочной дисперсии $\hat{\sigma}_{\text{он}}^2$ (которую имеет ограниченного размера выборка замеров интенсивности экосигналов от этого ОН) с дисперсией $\sigma_{\text{он}}^2$ тех же замеров в генеральной совокупности (в выборке неограниченного размера).

Исследуем изменение порога селекции, т. е. правой части выражения (7), при неограниченном увеличении числа κ обнаружений объекта.

Очевидно, что, чем больше κ , тем с большей точностью вычисляется выборочная дисперсия $\hat{\sigma}^2$ и тем выше можно выбрать порог, сохраняя условную вероятность P_F ложной селекции ОН на заданном уровне. Используя формулу Стирлинга $\kappa! \approx \kappa^{\kappa} e^{-\kappa} \sqrt{2\pi\kappa}$ при $\kappa \rightarrow \infty$ и правило раскрытия неопределенностей (правило Лопиталя), получим, что при $\kappa \rightarrow \infty$ значение порога стремится к величине $e^{-1} \sigma_{\text{он}}^2 \approx 0,37 \sigma_{\text{он}}^2$.

Условная вероятность P_F ложной селекции ОН определяется как [9]

$$P_F = \mathbf{P} \left\{ \frac{\kappa-1}{\sigma_{\text{он}}^2} \cdot \hat{\sigma}^2 \leq t \mid H_{\text{он}} \right\} = F_{\chi_{\kappa-1}^2}(t),$$

где $t = \frac{2M}{1-M} (\ln \eta - \kappa \ln \sqrt{M})$; $F_{\chi_{\kappa-1}^2}(t)$ – функция распределения χ^2 с $\kappa-1$ степенями свободы; $M = \sigma_{\text{одо}}^2 / \sigma_{\text{он}}^2$ (здесь $\sigma_{\text{одо}}^2$ – дисперсия интенсивности экосигналов от ОДО); η – порог, определяемый априорными вероятностями классов и стоимостями потерь от принимаемых решений.

Аналогично записывается и условная вероятность P_D правильной селек-

ции ОДО, т. е. отношения ОДО к ложным объектам [9]

$$P_D = \mathbf{P} \left\{ \frac{\kappa-1}{\sigma_{\text{одо}}^2} \cdot \hat{\sigma}^2 \leq \frac{t}{M} \mid H_{\text{одо}} \right\} = F_{\chi_{\kappa-1}^2} \left(\frac{t}{M} \right).$$

Приведенные результаты характеризуют потенциальный уровень эффективности селекции ОН от ОДО, достигаемый при знании указанной выше априорной информации. На практике обычно отсутствует как необходимый для определения распределений характеристик экосигналов объем натурального эксперимента в широком диапазоне условий наблюдения объектов, так и достаточно полная информация о конкретных характеристиках этих условий.

В связи с этим рассмотрим решающее правило селекции, которое не требует знания априорной информации указанного рода.

Решающее правило III. Поставим следующую задачу: имеем ряд (5), составленный из случайных величин (выборочных дисперсий), которые расположены в порядке убывания их значений. Некоторому числу (которое неизвестно) первых элементов этого ряда соответствуют ОН, остальным элементам – ОДО. Требуется определить границу перехода от больших значений выборочных дисперсий к малым. Если такая граница будет найдена, то решающее правило III может быть сформулировано следующим образом: считать, что элементам ряда (5), расположенным до границы, соответствуют ОН, а остальным элементам – ОДО.

Поскольку рассматривается случай, когда истинные значения дисперсий σ_j^2 , $j=1,2,\dots,s$ неизвестны, то решающее правило селекции может быть построено на основе проверки гипотезы равенства дисперсий в двух генеральных совокупностях по независимым выборкам из них.

Если мы имеем дело с выборками, извлеченными из нормальных совокупностей, то критерии значимости для различных величин могут быть основаны на точных выборочных распределениях. На практике величины, встречающиеся в различных областях статистики, очень часто могут считаться хотя бы приближенно нормальными. В таких случаях критерии, выведенные для нормального случая, обычно дают удовлетворительное приближение [12].

Типичная пара гипотез задается в виде основной гипотезы H_0 , заключающейся в том, что $\sigma_1^2 = \sigma_2^2$, и односторонней конкурирующей гипотезы H_1 , означающей, что $\sigma_1^2 / \sigma_2^2 > 1$. Проверку организуют таким образом, чтобы вероятность отклонения верной гипотезы H_0 равнялась некоторой заранее заданной величине. Эту величину называют уровнем значимости критерия.

Использование для проверки гипотезы H_0 отношения правдоподобия эквивалентно использованию [8] отношения Снедекора $F = \hat{\sigma}_1^2 / \hat{\sigma}_2^2$, которое имеет распределение Снедекора $S(\kappa_1-1, \kappa_2-1)$ (или, иначе, F-распределение), когда гипотеза H_0 верна. Причем в качестве числителя $\hat{\sigma}_1^2$ обычно берут большую из двух несмещенных оценок дисперсий. F-распределение зависит только от чисел степеней свободы $\nu_1 = \kappa_1 - 1$ и $\nu_2 = \kappa_2 - 1$, если выборки имеют размеры: κ_1 – первая и κ_2 – вторая.

Поскольку с гипотезой H_0 : $\sigma_1^2 = \sigma_2^2$ конкурирует гипотеза H_1 : $\sigma_1^2 / \sigma_2^2 > 1$, то в качестве критического значения для отношения $\hat{\sigma}_1^2 / \hat{\sigma}_2^2$ выбирают α -процентную точку F-распределения $F(\alpha; \nu_1, \nu_2)$, где α – заданный уровень значимости, выраженный в процентах. Таким образом, если $\hat{\sigma}_1^2 / \hat{\sigma}_2^2 > F(\alpha; \nu_1, \nu_2)$, то гипотезу H_0 следует отвергнуть. При этом вероятность отвергнуть гипотезу H_0 , когда она верна, равна $\alpha/100$.

Учитывая, что ряд (5) является убывающим, решающее правило селекции можно представить следующим образом: последовательно увеличивая i , $i=1,2,\dots,s-1$, необходимо контролировать выполнение условия $\hat{\sigma}_{j_i}^2 / \hat{\sigma}_{j_{i+1}}^2 > F(\alpha; \nu_{j_i}, \nu_{j_{i+1}})$; при его выполнении (например, при $i=i^*$) объекты, соответствующие i^* первым элементам ряда (5), т. е. принадлежащие множеству $\{j_1, j_2, \dots, j_{i^*}\}$, следует отнести к ОН, остальные – к ОДО.

Результаты расчетов. Оценка решающих правил селекции осуществлялась методом статистических испытаний на ПЭВМ и по тем же критериям, по которым оценивались решающие правила, построенные с использованием ОП «число обнаружений».

В качестве исходных данных были выбраны:

- размер выборки замеров интенсивности экосигналов (число обзоров БРЛС $\kappa=16$);
- число ОН в МГО $s_{\text{он}}=7$;
- число ОДО $s_{\text{одо}}=10$;
- «статистическая контрастность» – хорошая ($\tau_{0,5}^{(\text{он})}=100\text{мс}$; $\tau_{0,5}^{(\text{одо})}=10\text{мс}$) и плохая ($\tau_{0,5}^{(\text{он})}=50\text{мс}$; $\tau_{0,5}^{(\text{одо})}=20\text{мс}$);
- оптимизация порога селекции в решающем правиле II выполнялась при $P_F=0,1$ и $0,2$;
- уровни значимости критерия в решающем правиле III $\alpha=10$ и 25% (соответствующие пороги $F(\alpha; \nu_1, \nu_2)=1,97$ и $1,43$ [13]).

Результаты расчетов $k_{\text{п.о.}}$ и $k_{\text{т.о.}}$, усредненные по числу статистических испытаний, приведены в табл. 2.

По данным, приведенным в табл. 2, можно сформулировать следующие выводы:

1. При хорошей «статистической контрастности»:

Таблица 2
Результаты расчетов полноты и точности отображения МГО (упорядочение объектов по выборочной дисперсии интенсивности эхосигналов)

Решающее правило		«Статистическая контрастность»					
		хорошая ($\tau_{0,5}^{(он)} = 100$ мс; $\tau_{0,5}^{(одо)} = 10$ мс)			плохая ($\tau_{0,5}^{(он)} = 50$ мс; $\tau_{0,5}^{(одо)} = 20$ мс)		
		Порог селекции	$k_{п.о.}$	$k_{т.о.}$	Порог селекции	$k_{п.о.}$	$k_{т.о.}$
I	$R = 0$	–	1	0	–	0,97	0,02
	$R = 1$	–	1	0,1	–	0,99	0,11
	$R = 2$	–	1	0,2	–	0,99	0,21
II	$P_F = 0,1$	259	0,97	0	209	0,97	0,22
	$P_F = 0,2$	284	0,96	0	229	0,96	0,05
III	$\alpha = 10\%$	1,97	0,99	0,79	1,97	1	0,9
	$\alpha = 25\%$	1,43	0,86	0	1,43	0,79	0

Примечание: α – уровень значимости критерия.

- все три решающих правила обеспечивают максимально возможную ($k_{п.о.} = 1$) или близкую к ней эффективность отображения МГО;
- модификация решающего правила I (при $R > 0$) нецелесообразна, поскольку она приводит к снижению точности (росту $k_{т.о.}$);
- уменьшение для решающего правила III (за счет выбора $\alpha = 25\%$) порога селекции обеспечивает максимально возможное ($k_{п.о.} = 0$) качество отображения МГО при незначительном снижении $k_{п.о.}$.

2. При плохой «статистической контрастности»:

- все три решающих правила обеспечивают максимально возможную ($k_{п.о.} = 1$) или близкую к ней эффективность отображения МГО;
- модификация решающего правила I (при $R > 0$) нецелесообразна, поскольку она приводит к снижению точности (росту $k_{т.о.}$);
- более существенное (до $k_{т.о.} = 0$) повышение качества отображения МГО обеспечивает уменьшение порога селекции для решающего правила III (за счет выбора $\alpha = 25\%$), чем его увеличение для решающего правила II (за счет выбора $P_F = 0,2$).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Исследованы решающие правила селекции ОН от ОДО на основе упорядо-

чения обнаруженных объектов по ОП «число обнаружений» и «выборочная дисперсия интенсивности эхосигналов» – соответственно решающие правила первой и второй группы.

В каждую группу входят решающие правила, учитывающие наличие и состав априорной информации или ее отсутствие:

- *решающее правило I* использует априорную информацию о числе ОН в составе обнаруженных объектов;
- *решающее правило II* построено с учетом знания полной априорной информации, необходимой для оптимизации его параметров;
- *решающее правило III* построено для случая отсутствия знания полной априорной информации.

Оценка решающих правил селекции осуществлялась по критериям полноты ($k_{п.о.}$) и точности ($k_{т.о.}$) отображения МГО.

При принятых параметрах хорошей «статистической контрастности»:

- все рассмотренные решающие правила селекции обеспечивают как максимально возможную ($k_{п.о.} = 1$) или близкую к ней эффективность, так и максимально возможное ($k_{т.о.} = 0$) или близкое к нему качество (при соответствующем выборе параметров) отображения МГО.

В принятых условиях плохой «статистической контрастности»:

- при соответствующем выборе параметров решающие правила, построенные с использованием ОП «выборочная дисперсия интенсивности эхосигналов», по отношению к соответствующим решающим правилам, которые основаны на ОП «число обнаружений», имеют более высокие эффективность и качество отображения МГО.

ЛИТЕРАТУРА

1. Справочник по эффективным поверхностям рассеяния основных классов кораблей и летательных аппаратов иностранных государств / Под ред. Л.Н. Гриненко. – М.: Изд-во МО СССР, 1980. – 230 с.
2. ТИИЭР. – 1964. – Т. 52. – № 1. – С. 101–104.
3. Naval Forces. – 1988. – Spec. Suppl.: Blohm & Voss. – P. 50–52.
4. Ткаченко В.П., Турнецкий Л.С., Птицын С.О. Зондирующий сигнал с большой базой – универсальный инструмент для комплексного решения радиолокационных задач // Изв. РАРАН. – 2005. – Вып. 4 (45). – С. 31–36.
5. Уилкс С. Математическая статистика. – М.: Наука, 1967. – 632 с.
6. Морская радиолокация / В.И. Винокуров, В.А. Генкин, С.П. Калениченко и др.; Под ред. В.И. Винокурова. – Л.: Судостроение, 1986. – 255 с.
7. Wilmots, Flake Robert H., Rinson Claid C. Spectral characteristics of radar echoes from aircraft dispensed chaff // IEEE Trans. – 1985. – Vol. AES-21. – No 1.
8. Тихонов В.И. Статистическая радиотехника. – М.: Радио и связь, 1982. – 624 с.
9. Подоплёкин Ю.Ф., Мальцев О.Г. Различия надводных объектов по межобзорным флуктуациям меры интенсивности эхосигналов // Изв. РАРАН. – 2007. – Вып.1(51). – С.18–24.
10. Агемян Т.А. Основы теории ошибок для астрономов и физиков. – М.: Наука, 1972. – 172 с.
11. Володин Б.Г., Ганин М.П., Динер И.Я., Комаров Л.Б., Свешников А.А., Старобин К.Б. Сборник задач по теории вероятностей, математической статистике и теории случайных функций / Под общей ред. д-ра техн. наук проф. А.А. Свешникова. – М.: Наука, 1965. – 632 с.
12. Г. Крамер. Математические методы статистики / Пер. с англ. – М.: Мир, 1975. – 648 с.
13. Большев Л.Н., Смирнов Н.В. Таблицы математической статистики. – М.: Наука, 1965. – 464 с. ■

Актуальность задачи. Одной из важнейших технических задач, стоящих перед современным судостроением и смежными областями морской техники, является разработка эффективных, технологически доступных и высокоточных методов измерения волнообразующих свойств морских судов как в натурных условиях, так и при проведении экспериментальных исследований на масштабных моделях в гидродинамических бассейнах [1–5]. Эти свойства оказывают существенное влияние на ходкость судна, его топливную эффективность, динамику движения, а также на воздействие судна

на окружающую водную среду, что напрямую связано с проблемами энергоэффективности и экологической безопасности. Следовательно, повышение точности и оперативности методов измерения волнообразующих эффектов – не только научная задача, но и практическая потребность, диктуемая требованиями современного судостроения и эксплуатации флота.

К числу традиционно используемых методов исследования волнообразующих свойств относятся буксировочный [1, 2] и инерционный [3]. *Буксировочный метод* предполагает проведение испытаний в условиях специализированных полигонов или опытных бассейнов, оснащенных дорогостоящей инфраструктурой, что накладывает значительные ограничения на его массовое применение. Кроме того, необходимость использования крупногабаритных технических средств, сложность организации эксперимента и ограниченная вариативность условий испытаний дополнительно снижают его универсальность.

Инерционный метод характеризуется рядом существенных преимуществ. Он не требует масштабных организационно-технических подготовительных мер, может применяться непосредственно в реальных условиях эксплуатации судов и основывается на анализе временных зависимостей параметров инерционного движения, которые прямо или косвенно отражают волнообразующие свойства исследуемого объекта [6]. Такая концепция открывает возможность проведения измерений на ходу, без вывода судна из рабочей деятельности, что делает данный метод перспективным инструментом для оперативной оценки гидродинамических характеристик. Гибкость, технологическая простота и потенциальная возможность интеграции в современные судовые навигационные и мониторинговые системы дополнительно подчеркивают его актуальность.

Рассмотрим и подробно проанализируем работу радиолокационного измерительного комплекса (РИК), реализующего принципы инерционного метода и функционирующего на базе берегового двухкоординатного радара (2D-радар), обеспечивающего определение дальности и азимута до контролируемого судна [7–9]. В данной конфигурации радиолокационная станция выполняет роль основного сенсорного элемента, формирующего поток данных о движении судна, а программно-вычислительные средства комплекса осуществляют обработку информации, фильтрацию измерений, оценку параметров движения и последующее вычисление волнообразующих характеристик.

Прикладная значимость РИК проявляется в широком спектре практических задач. Так, использование таких комплексов может оказаться крайне полезным при проектировании обводов корпусов судов и других объектов водного транспорта, когда требуется быстрое и достоверное получение данных о взаимодействии корпуса с волновой средой. Кроме того, РИК может служить функциональным элементом береговых систем управления движением судов, обеспечивая дополнительную информацию для повышения безопасности и эффективности судоходства. Существенную роль подобные системы могут

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ БЕРЕГОВОЙ РАДИОЛОКАЦИОННОЙ СТАНЦИИ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ВОЛНООБРАЗУЮЩИХ СВОЙСТВ МОРСКИХ СУДОВ

Е. К. Самаров, д-р техн. наук, декан факультета естественных наук,
Я. Ю. Ионченкова, ст. преподаватель кафедры математики,
СПбГМТУ,

контакт. тел. +7 (926) 294 6744, omega511@mail.ru, ionchenkova_yana@mail.ru

играть и при оценке технического состояния корпуса судов, позволяя косвенно судить о загрузке, изменении ходкости и других эксплуатационных параметрах.

С учетом перечисленных факторов РИК может рассматриваться как перспективное средство экспресс-измерений волнообразующих свойств морских судов, которое сочетает доступность радиолокационных технологий с высокой информативностью инерционных методов. Такое совмещение открывает новые возможности для мониторинга и анализа поведения судов на водных путях, способствуя как научному прогрессу, так и практическому улучшению эксплуатационных процессов флота.

Модель измерительного комплекса. При анализе процесса инерционного выбега судна рассматривается ситуация, когда после прекращения воздействия движителя судно продолжает движение по инерции и постепенно замедляется под действием суммарной тормозящей силы динамического сопротивления воды. Это сопротивление носит гидродинамический характер и определяется сложным взаимодействием корпуса судна с окружающей жидкостью, включая влияние волн, вязкости, турбулентности и поверхностных эффектов. В таких условиях ключевой задачей измерительного комплекса является получение максимально точной информации о положении и кинематических параметрах движущегося судна на различных этапах его замедления.

Для этой цели используется береговой двухкоординатный радиолокатор (2D-радар), позволяющий измерять дальность и азимут до судна в режиме непрерывного наблюдения. Работа радара организована в декартовой системе координат oxy , положение судна в которой задается функциями $x(t)$ и $y(t)$. Измеренные радаром значения могут быть представлены следующими зависимостями:

$$R_k = \sqrt{x^2(t_k) + y^2(t_k)} + \xi_k, \quad \Phi_k = \arctg(y(t_k)/x(t_k)) + \zeta_k, \quad R_k = R(t_k),$$

где $R_k = R(t_k)$ и $\Phi_k = \Phi(t_k)$ – измеренные дальность и азимут в моменты времени t_k ; величины ξ_k и ζ_k описывают инструментальные ошибки измерительной аппаратуры, включающие как аппаратный шум, так и возможные эффекты влияния внешней среды [10–12].

При этом считается, что истинные координаты судна являются неизвестными параметрами, подлежащими оценке на основе радиолокационных измерений.

Так как движение судна в режиме свободного выбега осуществляется практически строго вдоль прямой линии, сложная двумерная задача может быть сведена к одномерной. Это существенно упрощает обработку данных и снижает вычислительные затраты [13, 14]. Расстояние, пройденное судном вдоль прямой траектории, определяется по формуле

$$d(t_k) = \sqrt{(-\tilde{x}_1)^2 + (\tilde{y}_k - \tilde{y}_1)^2}, \quad k = \underline{1}, n,$$

где $\tilde{x}_k = R_k \cos \Phi_k$; $\tilde{y}_k = R_k \sin \Phi_k$.

Таким образом, измеренные радаром данные преобразуются в набор расстояний, соответствующих фактическому положению

нию судна вдоль траектории его движения.

На следующем этапе применяется процедура сглаживания измерительного ряда $\{d(t_k), k=1, n\}$ [4], что позволяет снизить влияние шумов и измерительных ошибок, а также получить устойчивые оценки первой и второй производных – скорости $V(t_k)$ и ускорения $a(t_k)$ судна в процессе инерционного выбега. Эти величины имеют ключевое значение, поскольку именно по ним определяются параметры гидродинамического сопротивления.

Переходя к модели сопротивления, воспользуемся определением числа Фруда:

$$Fr(t_k) = \frac{V(t_k)}{\sqrt{gL}},$$

где g – ускорение свободного падения, L – длина судна по ватерлинии.

Число Фруда позволяет нормировать скорость относительно характерных длинных параметров корпуса и является основным параметром, определяющим волнообразующие эффекты.

С учетом модели гидродинамического сопротивления имеем систему

$$\begin{cases} \chi(t_k) = -[1 + \rho(t_k)]a(t_k); \\ Fr(t_k) = V(t_k) / \sqrt{gL}, k = \underline{1}, n, \end{cases} \quad (1)$$

где функция $\rho(t_k)$ представляет собой поправочный коэффициент, учитывающий нестационарность процесса торможения, возможные отклонения траектории, геометрию корпуса судна, а также влияние дополнительных гидродинамических факторов.

Исключив время t_k из системы (1), сопоставляя значения сопротивления и соответствующие им числа Фруда, получаем зависимость

$$\chi_k = \chi(Fr), \quad k = \underline{1}, n. \quad (2)$$

Особый интерес представляет анализ производной $\chi_k / \partial Fr_k$, $k = \underline{1}, n$. Точка максимума этой производной соответствует такому значению числа Фруда Fr_b , при котором заканчивается процесс диссипации волн, созданных судном до момента начала выбега. Поскольку волновое сопротивление – основная составляющая гидродинамических потерь при достаточно больших скоростях, момент, когда влияние волнового компонента существенно снижается, служит важным критерием оценки волнообразующей способности судна.

Суда, для которых значение Fr_b выше, характеризуются меньшим уровнем волнообразования. Это связано с тем, что волновые возмущения, создаваемые такими судами, имеют меньшую интенсивность и быстрее рассеиваются, вследствие чего влияние волновой составляющей сопротивления прекращается раньше. Данная закономерность лежит в основе метода оценки волнообразующих свойств судов [5], и ее использование позволяет классифицировать суда по степени их воздействия на волновую среду, что имеет важное значение при проектировании, эксплуатации и экологической оценке объектов водного транспорта.

Результаты компьютерного и экспериментального моделирования. Рассмотренная в предыдущем разделе математическая модель измерительного процесса была реализована в составе РИК, структурная схема которого представлена на рис. 1.

Данный комплекс включает в себя полный набор аппаратных и программных средств, осуществляющих регистрацию радиолокационных сигналов, их преобразование, предварительную обработку, вычисление кинематических характеристик судна и последующую оценку гидродинамических параметров его движения. Применение комплекса позволяет выполнять измерения в реальном масштабе времени и многократные серии наблюдений без необходимости прибегать к специализированным водным полигонам или лабораторным установкам.

Основу измерительного узла комплекса составляет высокоточная радиолокационная щелевая антенна двухкоординатного типа длиной 5,4 м. Благодаря значительным геометрическим

размерам она обеспечивает высокий уровень направленности и формирует в горизонтальной плоскости диаграмму направленности с угловым разрешением порядка $0,39^\circ$, что позволяет достичь высокой точности определения азимута на удаленные объекты. Применяемый генератор излучения формирует синхроимпульсы и радиоимпульсы с длительностью 0,5 мкс и выходной импульсной мощностью около 50 кВт. Этот набор характеристик позволяет осуществлять надежное обнаружение судов на значительных дистанциях, а также обеспечивает уверенную работу в условиях переменчивой метеорологической обстановки.

Сигналы, принимаемые антенной, усиливаются и выделяются в видеодетекторе приемоусилительного устройства, после чего эхо-сигналы поступают на первый канал двухканального аналого-цифрового преобразователя (АЦП). АЦП осуществляет дискретизацию с частотой 50 МГц, что позволяет детально фиксировать структуру принимаемого импульса, а 12-разрядный динамический диапазон обеспечивает достаточную точность квантования даже для слабых сигналов, ослабленных дальностью или зашумленных помехами. На второй вход АЦП подаются синхроимпульсы от генератора передатчика, которые обеспечивают временную привязку момента излучения к началу отсчета дальности. Такая схема синхронизации позволяет однозначно интерпретировать задержку сигнала и точно определять положение судна в пространстве.

Компьютерная система обработки представляет собой специализированный программный комплекс, разработанный на основе оригинального пакета вычислительных процедур. Он реализует полный цикл обработки данных: от первичной фильтрации и сглаживания временных рядов до реконструкции траектории движения, расчета скорости и ускорения, а затем и вычисления удельных гидродинамических сопротивлений в соответствии с предложенной ранее моделью.

Полунатурное компьютерное моделирование. Существенную роль в исследовании работы РИК играет метод полунатурного моделирования. Его концепция основана на комбинированном подходе, включающем:

1. *Использование экспериментальных данных измерения скорости инерционного движения реального судна*, полученных в ходе натурных наблюдений.

2. *Имитационное компьютерное моделирование*, позволяющее оценить влияние погрешностей радара на точность вычисления волнообразующих свойств.

Такой подход позволяет не только проверить корректность математической модели и алгоритмов обработки данных, но и исследовать устойчивость результатов к инструментальным погрешностям и шумам измерительной аппаратуры. Это особенно важно при работе с радиолокационными устройствами, для которых характерны ошибки углового и дальномерного измерения.

В рассматриваемом случае погрешности радара моделировались следующим образом:

- *дальномерная ошибка* ξ_k равномерно распределялась в интервале $[-6,25; 6,25]$ м;
- *угловая ошибка* ζ_k имела равномерное распределение в диапазоне $[-0,06; 0,06]^\circ$;
- период полного вращения антенны составлял 3 с, что определяет дискретность обновления информации о положении судна на азимутальной развертке.



Рис. 1. Структурная схема радиолокационного измерительного комплекса

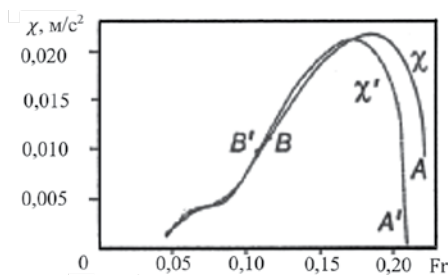


Рис. 2. Зависимость удельного гидродинамического сопротивления χ инерционного движения от числа Фруда Fr

Такая схема моделирования позволяет максимально приближенно воспроизвести реальные условия функционирования измерительного комплекса.

Использованные натурные параметры судна. В качестве исходных данных были использованы результаты реальных измерений инерционного выбега судна грузового класса. Для повышения достоверности моделирования фиксировались параметры:

- длина судна по ватерлинии $L = 150$ м;
- объемное водоизмещение $V_{vol} = 20\,200$ м³;
- начальная скорость выбега $V_1 = 8,2$ м/с;
- общая длительность регистраций – 1500 с;
- количество измерений $n = 500$.

Значения поправочного коэффициента ρ определяли, исходя из типовых зависимостей [2], учитывающих особенности гидродинамики судов аналогичного класса. Данный коэффициент необходим для корректного учета влияния нестационарности и изменяющейся геометрии потока жидкости вокруг корпуса.

На рис. 2 представлены зависимости удельного гидродинамического сопротивления судна от относительной скорости, характеризуемой числом Фруда Fr . Эти графики отражают динамику изменения гидродинамических потерь в процессе выбега и позволяют выделить ключевые особенности взаимодействия судна с волновой средой. Полученные результаты подтверждают работоспособность радиолокационного комплекса, а также демонстрируют, что точность вычисления волнообразующих свойств остается приемлемой даже в условиях наличия реальных инструментальных погрешностей радара.

Сплошная кривая χ , которая принимается в качестве базовой, представляет собой эталонную зависимость удельного гидродинамического сопротивления судна, полученную по высокоточным данным лага. Использование лаговых измерений оправдано тем, что они традиционно считаются наиболее надежными при оценке скорости судна, а значит, и при вычислении производных характеристик его движения. Соответственно, базовая кривая служит своеобразным «стандартом» для последующего сравнения результатов, полученных с применением РИК.

Кривая χ иллюстрирует одну из возможных статистических реализаций решения задачи, заданной уравнениями (1) и (2), при учете всех факторов, влияющих на точность радиолокационных измерений – погрешностей дальности и азимута, дискретности обновления данных, шумов в процедуре сглаживания и модели вычисления скорости и ускорения. Показанный на графике вариант соответствует наиболее неблагоприятному, «наихудшему», случаю реализации шумов радара, что позволяет оценить границы применимости РИК в реальных условиях.

Точки A, A' на графике указывают на начало инерционного выбега судна, т.е. на момент времени, когда прекращается воздействие движителей и движение осуществляется исключительно по инерции. Эти точки важны, поскольку именно от них начинается анализ зависимости сопротивления от числа Фруда и формируется область данных, используемая в вычислении характеристик выбега.

Координаты точек B, B' на плоскости (Fr, χ) служат количественной мерой при сравнении волнообразующих свойств различных судов. Физически точка B соответствует значению числа Фруда Fr_B , при котором можно считать завершенным процесс

диссипации волн, созданных судном перед началом выбега. Чем меньше интенсивность волнообразующих процессов, тем раньше исчезает волновая составляющая сопротивления и тем меньше значение Fr_B .

Полученные с помощью РИК значения удельного сопротивления χ' закономерно отличаются от базовых, поскольку радарные измерения сопровождаются инструментальными ошибками, а вычислительный процесс включает в себя фильтрацию, аппроксимацию и численное дифференцирование. Однако важным является не абсолютное расхождение кривых, а способность РИК надежно воспроизводить характер зависимости сопротивления и корректно определять ключевые величины, такие как точка B .

Погрешности вычисления и их оценка. Для того чтобы количественно оценить точность определения зависимости удельного сопротивления, введена величина

$$\gamma = \|\delta\chi\| / (\chi_B \sqrt{n}),$$

где $\|\delta\chi\| = \|\chi - \chi'\|$ – евклидова норма разности между базовыми значениями удельного сопротивления, вычисленными по данным лага, и соответствующими значениями, полученными с использованием радара. Норма позволяет определить суммарное отклонение результатов двух методов по всему диапазону исследуемых чисел Фруда.

Величина χ_B соответствует значению удельного сопротивления в области точки B и служит для нормирования ошибки, что делает показатель γ независимым от масштаба сопротивления и обеспечивает сравнимость результатов для судов разных размеров. Деление на $\sqrt{n}$ вводится для корректного учета числа измерений, сглаживающего суммарную ошибку за счет статистических свойств шумов.

Кроме того, важной характеристикой является погрешность определения точки B , оцениваемая с использованием выражения

$$\delta Fr_B = (Fr_B - Fr_{B'}) / Fr_B,$$

где $Fr_B, Fr_{B'}$ – значения числа Фруда в точке B по лагу и РИК соответственно. Эта величина характеризует относительное расхождение в определении момента исчезновения волнового сопротивления и является ключевой при оценке волнообразующих свойств судов. Поскольку именно параметр Fr_B лежит в основе сравнительной классификации судов по интенсивности волнообразования, точность его определения имеет принципиальное значение.

Анализ результатов. На рис. 3 представлены графики зависимостей:

- $\bar{\gamma} = M[\gamma]$ – среднее значение относительной погрешности определения удельного сопротивления,
- $\delta Fr_B = M[\delta Fr_B]$ – средняя погрешность определения числа Фруда в точке B , построенные в зависимости от расстояния R между начальной точкой выбега и радаром.

Здесь оператор $M[\cdot]$ обозначает математическое ожидание, полученное по ансамблю статистических реализаций моделирования [4].

Представленные на графиках зависимости позволяют судить о том, как ухудшение условий наблюдения (увеличение расстояния до судна, снижение разрешающей способности радара, рост угловой ошибки) влияет на точность восстановления гидродинамических характеристик. Анализ этих зависимостей играет центральную роль при оценке пригодности радиолокационного метода для измерений в различных акваториях и при разных конфигурациях движения судов.

Усреднение результатов моделирования по ансамблю статистических реализаций выполнялось с использованием пакетного ортогонального вейвлета Коифлета, обладающего высокими аппроксимационными свойствами и симметрией, что делает его особенно подходящим для анализа шумовых сигналов, содержащих как высокочастотные, так и медленно изменяющиеся компоненты. Используемая четырехуровневая декомпозиция позволяет эффективно разделять составляющие сигнала по частотным диапазонам, что обеспечивает более точное выделение тренда и устранение флуктуаций, вызванных

инструментальными погрешностями радара.

Применение вейвлет-преобразования на этапе усреднения оправдано тем, что оно позволяет адаптивно регулировать степень сглаживания в зависимости от локальных свойств сигнала, не внося существенных искажений в реальные структуры данных. Это особенно важно в задачах оценки гидродинамических характеристик, где искажения формы зависимостей могут привести к ошибкам в определении ключевых параметров, таких как точка В или производные характеристик сопротивления.

Полученные таким образом средние значения γ и δFr_B соответствуют наилучшему варианту траектории движения судна, при котором курс объекта совпадает с направлением на радар. В этой конфигурации минимизируются ошибки азимутального измерения, что позволяет получить наиболее благоприятные условия наблюдения.

В противоположность этому величины γ' и $\delta Fr_B'$ были рассчитаны для наихудшего варианта траектории, когда курс судна в начальной точке выбега ориентирован перпендикулярно азимутальной прямой радара. В такой ситуации азимутальная ошибка, даже при небольших значениях шумов, приводит к значительному отклонению в реконструируемой траектории движения, что закономерно ухудшает точность оценивания гидродинамических параметров.

Оценка вариативности результатов. Поскольку величины γ и δFr_B обладают выраженной статистической природой – их значения зависят от конкретной реализации шумов радара и особенностей процедуры сглаживания, наряду со средними значениями вычислялись также средние квадратические отклонения от величин γ , γ' , δFr_B , $\delta Fr_B'$.

Полученные значения составили:

$$\sigma(\gamma) \approx 0,002 \text{ м/с}^2, \sigma(\gamma') \approx 0,003 \text{ м/с}^2, \sigma(\delta Fr_B) \approx 0,008 \text{ м/с}^2, \\ \sigma(\delta Fr_B') \approx 0,009 \text{ м/с}^2.$$

Эти значения демонстрируют, что даже при учете неблагоприятных траекторий и максимальных шумов вариативность оценок остается умеренной. Небольшие величины среднеквадратических отклонений свидетельствуют о высокой стабильности методики и достаточной устойчивости к погрешностям радиолокационных измерений.

Из анализа данных видно, что переход от оптимальной к наихудшей конфигурации приводит к росту разброса значений, однако этот рост не критичен. Таким образом, РИК обеспечивает приемлемую точность оценивания волнообразующих свойств судов на широком диапазоне расстояний и курсовых углов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе был выполнен развернутый анализ возможностей измерения волнообразующих свойств морских судов с использованием РИК, построенного на базе береговой радиолокационной станции и оснащенного специализированными средствами цифровой обработки сигналов. Рассмотренная методика позволила исследовать процесс инерционного выбега судна на основе радиолокационных данных, преобразованных в кинематические параметры движения, а также сопоставить полученные результаты с эталонными зависимостями, рассчитанными по данным лага.

Проведенные исследования, включая полунатурное компьютерное моделирование, анализ статистических реализаций, оценку влияния инструментальных погрешностей и экспериментальное подтверждение работоспособности модели, показали, что точность восстановленных зависимостей удельного гидродинамического сопротивления от числа Фруда находится на уровне, достаточном для решения практических задач. Особенно важно, что даже при неблагоприятных траекториях движения судна относительно радара и наличии существенных шумов измерения сохраняется стабильность оценок ключевых параметров, таких как точка завершения диссипации волн.

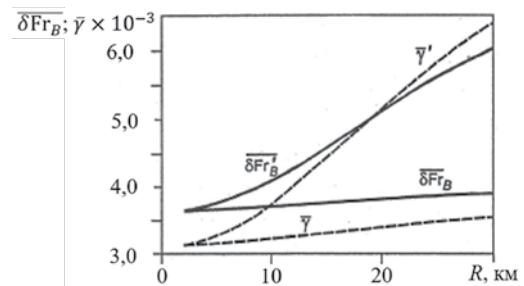


Рис. 3. Зависимость средних относительных погрешностей удельного гидродинамического сопротивления γ и числа Фруда δFr от дальности до объекта

γ' – при движении объекта на радар; γ' , $\delta Fr_B'$ – при движении объекта перпендикулярно направлению на радар

Полученные данные позволяют заключить, что радиолокационный измерительный комплекс обладает потенциалом для применения в задачах оперативной и сравнительной оценки волнообразующих свойств судов различных типов, а также может служить дополнительным инструментом при проектировании корпусов, анализе эффективности движения и мониторинге состояния флота. Практическая приемлемость точности комплекса делает возможным его использование в реальных судоходных условиях без необходимости специально оборудованных полигонов и сложной инфраструктуры.

В целом выполненное исследование подтверждает, что предложенная технология радиолокационного определения волнообразующих характеристик судов – это перспективный и функционально эффективный инструмент, способный расширить возможности современных систем мониторинга и анализа гидродинамических свойств объектов морского транспорта.

ЛИТЕРАТУРА

1. Справочник по теории корабля. Т. 1. Гидромеханика. Сопротивление движению судов. Судовые двигатели/Под ред. Я.И. Войткунского. – Л.: Судостроение. 1985. – 768 с.
2. Войткунский Я.М. Сопротивление движению судов. – Л.: Судостроение. 1988. – 288 с.
3. Selness J.N. Nature's Dynamometer: Hull Performance Profiles and Dynamic Resistance for Sailboat Hulls./Marine Technology. – 1989. – № 26. – Iss/3 (July). – P210–217.
4. Девятисильный А.С., Дорошко В.М., Гриняк В.М. К оценке силы сопротивления при неустановившемся движении морского объекта//Дальневосточный математический журнал. – 2002. – Т. 3. – № 2. – С. 277–284.
5. Готман А.Ш. Определение волнового сопротивления и оптимизация обводов судов. – Т. 1: Волновое сопротивление судов. – Новосибир. гос. академия водн. трансп., 1995. – 162 с.
6. Костюков А.А. Сопротивление воды движению судов. – Л.: Судостроение, 1966. – 448 с.
7. Акмайкин Д.А., Хоменко Д.Б. Совместное определение параметров цели с помощью судовой РЛС и транспондера АИС//Эксплуатация морского транспорта. – 2010. – № 4. – С. 48–51.
8. Бурмака А.И. Стратегия расхождения судов в ситуации чрезмерного сближения//Вестник ГУМРФ им. адм. С.О. Макарова. – 2014. – № 1. – С. 20–22.
9. Абрамович Б.Г. Судовые измерители скорости. – Владивосток: Изд. ДГМА, 2001. – 50 с.
10. Валеев С.Г. Регрессионное моделирование при обработке наблюдений. – М.: Наука, 1991. – 272 с.
11. Кузьмин С.З. Цифровая обработка радиолокационной информации. – М.: Сов. радио, 1967. – 400 с.
12. Сосулин Ю.Г. Теоретические основы радиолокации и радионавигации: учеб. пособие для вузов. – М.: Радио и связь, 1992. – 304 с.
13. Abbasova T.S., Artyushenko V.M., Samarov K.L. Modern methods of processing of video information and evaluating the quality of streaming video perception.//Biosciences Biotechnology Research Asia. – 2014. – Т. 11. – P. 265–268.
14. Artyushenko V.M., Volovach V.I. Information characteristics signals and noise with non-Gaussian distribution. – Moscow Workshop on Electronic and Networking Technologies, MWENT – 2018.//Proceedings. – 2018. № 1. – P. 1–5. ■

Санкт-Петербургское Морское собрание продолжает проведение комплекса мероприятий, посвященных 330-летию создания регулярного ВМФ России. Эта знаменательная дата послужила поводом для изучения истории образования и роли морских собраний России. Результаты этой работы озвучил председатель СПбМС С. Н. Ирютин в своем докладе «Морские собрания в становлении и развитии Российского флота», с которым он выступил на военно-исторической конференции ВМФ. Она состоялась 10 февраля 2026 г. в Адмиралтействе под руководством Главнокомандующего ВМФ. Доклад вызвал живой интерес. На его основе опубликована статья в журнале «Морской вестник» (2026 г., № 1) и готовится соответствующая публикация в Сборнике трудов Клуба адмиралов и СПбМС, выпуск которого запланирован на нынешний год.

В честь этой славной даты СПбМС выпустило памятную медаль «330 лет Российскому флоту», состоялось уже более ста персональных награждений этой медалью. Медали вручены Центральному военно-морскому музею, Военно-морскому институту–Морскому корпусу Петра Великого, Кронштадтскому морскому кадетскому корпусу, другим учреждениям и учебным заведениям.

330-летию создания регулярного Военно-морского флота России были посвящены 58-я и 59-я ассамблеи СПбМС, проведенные 30 января и 24 июля 2026 г.

Первым почетным председателем СПбМС был морской министр Российской империи адмирал Иван Константинович Григорович. Открытие выставки его работ состоялось 19 марта 2026 г. в музее Собрания. Выставка продолжит свою работу до 30 октября.

СПбМС совместно с Государственным музеем-заповедником «Изборск» и Центральным военно-морским музеем им. Петра Великого реализует проект «В сиянии Андреевского флага», посвященный 330-летию Российского флота и 250-летию со дня рождения адмирала Петра Ивановича Рикорда (1776–1855). В рамках этого проекта в течение года проведены экологическая акция «Чистые берега» (9 июня), XXII Псковская парусная регата (10–14 июня) и выставка «Одиссея адмирала П. И. Рикорда» в Государственном историко-архитектурном и природном музее-заповеднике «Изборск» (открытие – 11 июня).

23 июля 2026 г. состоялось заседание совета межрегиональной ассоциации общественных организаций «Ассоциация морских собраний». После

МЕРОПРИЯТИЯ САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКОГО МОРСКОГО СОБРАНИЯ, ПОСВЯЩЕННЫЕ 330-ЛЕТИЮ СОЗДАНИЯ РЕГУЛЯРНОГО ВОЕННО-МОРСКОГО ФЛОТА РОССИИ

С. Н. Ирютин, канд. воен. наук, доцент, капитан 1 ранга, председатель,

В. Н. Торба, капитан 1 ранга, историограф, Санкт-Петербургское Морское собрание,

С. А. Мозговой, капитан 1 ранга, руководитель Центра военного и морского наследия, контакт. тел. (812) 312 7092, morskoe-sobranie@yandex.ru, ist.morskoe-sobranie@yandex.ru, marine-heritage@yandex.ru



59-я Ассамблея Санкт-Петербургского Морского собрания



Председатель СПбМС С. Н. Ирютин и правнучка адмирала И. К. Григоровича Н. А. Московченко открывают выставку картин адмирала И. К. Григоровича



Проект «В сиянии Андреевского флага»



Адмирал П.И. Рикорд.
Портрет работы неизвестного художника, XIX в.

заседания участники совета посетили открытие выставки «Флот России в Великой войне» в Ратной палате Государственного музея-заповедника «Царское Село», посвященной 330-летию флота России.



Пригласительный билет на выставку

Недавно завершился межрегиональный профсоюзный автопробег «Морские волны: 330 лет славы и мощи!». Он состоялся в июле, нака-

нуне и в ходе празднования Дня ВМФ России. Автопробег был организован Ассоциацией профсоюзов плавсостава ВМФ, территориальной организацией Северного флота профсоюза гражданского персонала ВС РФ при поддержке

командования Северного флота, СПбМС, ДПФ, других ветеранских и общественных организаций страны. Он прошел по городам и весям, где зарождалась и ковалась военно-морская мощь России: Мурманск–Воронеж–Москва–Санкт-Петербург.

В автопробеге приняли участие 10 автомобильных экипажей, каждый из которых нес изображения военных кораблей и судов разных эпох становления ВМФ: от первого линейного корабля «Гото Предестинация» до новейшего патрульного корабля ледового класса «Иван Папанин», недавно (2025 г.) вошедшего в состав ВМФ России: легендарного крейсера «Аврора», ТАРК «Петр Великий», ракетного крейсера «Маршал Устинов», подводного ракетного крейсера «Александр Невский», БПК «Североморск», АПЛ «Лири» (реактор с жидкометаллическим теплоносителем), которая успешно несла боевую службу и дала стране Героев России, многоцелевой АПЛ К-461 «Волк», неутомимого труженика – морского буксира МБ-56.

Руководитель автопробега, председатель профсоюза Северного флота С. А. Кошкарев был на машине с логотипом первого линейного корабля



Экипаж машины № 7



Логотип на машине № 7

«Гото Предестинация» (экипаж № 1), а капитан морского буксира «МБ-56» С. В. Мещеряков – на машине с логотипом своего судна (экипаж № 2). Участники экипажа № 7 – действительный член СПбМС А. Г. Гайфутдинов и руководитель Центра военного и морского наследия, член редколлегии журнала «Морской сборник» капитан 1 ранга С. А. Мозговой шли на машине с логотипом патрульного ледокола «Иван Папанин». Они были лично знакомы с этим легендарным советским исследователем Арктики, дважды Героем Советского Союза, почетным членом Географического общества СССР и почетным гражданином Архангельска, Липецка, Мурманска, Севастополя и Ярославской области. Командир патрульного ледокола «Иван Папанин» капитан 2 ранга К. С. Ткаченко является членом СПбМС.

Стартовал автопробег 22 июля в городе-герое Мурманске. Возглавил автопробег председатель профсоюза Северного флота С. А. Кошкарев. Торжественная церемония старта прошла у Военно-морского музея Северного флота. Здесь участников автопробега напутствовали заместитель командующего Северным флотом контр-адмирал И. В. Курочкин, председатель Мурманской областной думы капитан 1 ранга в отставке С. М. Дубовой, ветеран Северного флота В. С. Низвецкий и североморская общественность, которые пожелали всем участникам «попутного ветра, ровных дорог и новых свершений во славу нашего великого флота!».

Глава регионального парламента капитан 1 ранга С. М. Дубовой отметил: «Россия была и остается великой страной, и немалая заслуга в этом принадлежит Военно-морскому флоту, которому исполнилось 330 лет со дня основания. Эта вежа – летопись мужества, героизма и преданности Родине. Морская слава страны создавалась доблестью военных моряков и их честной службой Отечеству. Быть военным моряком – это огромная честь и ответственность. Эта служба – для сильных духом. Тем важнее флотское братство, единство и сплоченность команды. Так было в годы Великой Отечественной войны, так есть сегодня».

Торжественным моментом стали минута молчания и церемония возложения цветов к памятному знаку первостроителям завода «Севморпуть» в поселке Роста – тем, кто в 1930-е гг. в суровых условиях Заполярья создал ремонтную базу для кораблей Северного флота. После чего под марш «Прощание славянки» в исполнении оркестра Северного флота колонна автопробега отправилась в путь.

Следующим крупным городом по маршруту следования стал один из старейших русских городов Ярославль, заложенный князем Ярославом Мудрым в 1010 г. на Стрелке при слиянии Волги и Которосли. Здесь участников акции встречал Н. В. Захаров, председатель профсоюзной организации Ярославского высшего военного училища противовоздушной обороны им. Маршала Советского Союза Л. А. Говорова.

Незабываемым стало знакомство участников автопробега с памятниками истории и культуры Ярославля. Связь Ярославля с историей ВМФ России многогранна: она уходит корнями в эпоху Петра I, связана с именами выдающихся флотоводцев и продолжается в шефских связях с флотом. Неподдалеку, на Плещеевом озере в Переславле-Залесском, царь Петр I в конце XVII в. создал Потешную флотилию, чем заложил будущее Российского флота.

В настоящее время на Плещеевом озере работает яхт-клуб. В ходе автопробега на машине № 7 был закреплен флаг Переславля-Залесского.

Этот опыт стал важным этапом масштабного строительства военного флота, сначала на воронежских верфях для Азовских походов, а затем и на Балтике в ходе Северной войны. В Ярославском крае, в селе Бурнаково (ныне – Рыбинский район), в 1745 г. родился будущий русский флотоводец адмирал Ф. Ф. Ушаков. На территории нынешней Ярославской области, в своём имении, в церкви Преображения Господня в Нагорье, в 1790 г. был похоронен выдающийся русский флотоводец, герой Чесменского сражения адмирал Г. А. Спиридов.

День ВМФ 2026 г. участники автопробега встретили на Адмиралтейской площади Воронежа. Организаторами праздничных мероприятий выступили Совет ветеранов ВМФ и администрация города. Здесь был развернут Андреевский флаг площадью 330 квадратных метров – ровно столько лет исполняется ВМФ России в этом году.

Участники мероприятия поздравили ветеранов и жителей города с Днем флота.

О его героической истории рассказали председатель Воронежской региональной общественной организации по пропаганде истории и традиций ВМФ «Колыбель русского флота» контр-адмирал Н. В. Ермаков, в составе которой более 20 тысяч моряков-воронежцев, заместитель председателя Координационного совета – председатель Комитета ветеранов войны и военной службы Координационного совета Международного союза «Содружество общественных организаций ветеранов (пенсионеров) независимых государств» капитан 1 ранга В. В. Бычков, председатель Совета ветеранов Воронежа капитан 1 ранга В. С. Пеньков и др. А жители Воронежа приветствовали и напутствовали участников профсоюзного автопробега. И хотя лил проливной дождь, настоящим морякам это не помеха. «Любые штормы может выдержать моряк», – эти строки звучали в унисон с настроением собравшихся. Участники экспедиции посетили корабль-музей «Гото Предестинация» и познакомились с музейной экспозицией, возложили цветы к памятнику Петру I и почтили память сподвижников Петра Великого – генерал-адмирала Ф. М. Апраксина и адмирала К. Крюйса в Успенском Адмиралтейском храме, которые сыграли большую роль в становлении Российского флота.

Следующим этапом автопробега стала столица нашей Родины – город-герой Москва. Здесь 28 июля у памятника Петру I в древней Измайловской усадьбе Романовых состоялся митинг, в котором приняли участие ветераны ВМФ, профсоюзные активисты, члены Российского военно-исторического общества, Общероссийского движения поддержки флота, СПбМС, Центра военного и морского наследия, представители управы района Измайлово, волонтеры и сотни неравнодушных жителей столицы. Перед собравшимися выступили председатель



Участники автопробега на площади Победы в Санкт-Петербурге

профсоюза гражданского персонала ВС РФ генерал-майор Н. Н. Бойко, заместитель председателя Координационного совета Международного союза ветеранов независимых государств капитан 1 ранга В. В. Бычков, председатель ДПФ капитан 1 ранга В. В. Мальцев, руководитель автопробега, председатель профсоюза Северного флота С. А. Кошкарёв и др. Так, капитан 1 ранга В. В. Бычков в своем выступлении акцентировал внимание участников митинга на 80-летию битвы за Москву и большой роли моряков в защите столицы: морские стрелковые бригады сражались на самых важных направлениях и с честью выполнили свой воинский долг. А флотский поэт капитан 1 ранга Г. П. Толузаков прочитал свои стихи, посвященные флоту.

Участники возложили цветы к памятнику основателя флота, а главным символом торжества стало традиционное разворачивание огромной копии Андреевского флага под марш «Славянки» на лужайке перед усадьбой, где когда-то юный Петр нашёл ботик «Святой Николай», ставший «дедушкой русского флота».

Из Москвы автопробег продолжил свой путь в Санкт-Петербург – город-герой Ленинград и финишировал на площади Победы в морской столице России.

Экипажи машин прошли 3640 км (или 1964 мор. мили) по 13 регионам страны. Здесь, 29 августа 2026 г., у монумента героическим защитникам Ленинграда участники автопробега приветствовали председатель Морского собрания Санкт-Петербурга С. Н. Ирютин, члены профсоюза Вооружённых сил России в Санкт-Петербурге и Ленинградской области, заместитель председателя Адмиралтейского координационного совета общественных организаций ветеранов ВМФ капитан 2 ранга А. М. Филиппов, многочисленные ветераны флота. У стен музея, хранящего память о самой страшной блокаде в истории, ровно в полдень над мемориалом разнесся бой склянок, а затем под звуки «Журавлей» участники автопробега и ветераны флота возложили цветы в память о защитниках Ленинграда.

Председатель СПбМС С. Н. Ирютин вручил награды Собрания участникам пробега.

Следующий день был посвящён знакомству с морскими памятниками и достопримечательными местами флота в городе. Участники автопробега посетили СПбМС, где С. Н. Ирютин и историкограф Собрания капитан 1 ранга В. Н. Торба рассказали об истории Морского собрания, про-



Возложение венков к Монументу героическим защитникам Ленинграда



Участники автопробега в Санкт-Петербургском Морском собрании

вели экскурсию по музейной экспозиции и по выставке картин адмирала И. К. Григоровича, возложили цветы к недавно (24 июля 2026 г.) открытой мемориальной доске нарком ВМФ СССР Адмиралу флота Советского Союза Н. Г. Кузнецову (Английская набережная, 38).

Автопробег продемонстрировал любовь россиян к флоту, стремление к сохранению и приумножению военно-исторической памяти и боевых традиций флота. Особенно трогательными были встречи ветеранов-североморцев, сослуживцев. Например, в Воронеже встретились товари-

щи – капитаны 1 ранга В. В. Бычков и В. С. Пеньков, а в Санкт-Петербурге капитаны 1 ранга С. А. Мозговой и Н. А. Трофимов, вместе служившие на БПК «Симферополь» (ныне БПК «Североморск») и др.

Таким образом, цели и задачи автопробега посвящённые популяризации славной истории ВМФ, патриотическому воспитанию молодежи и встрече ветеранов накануне 330-летия флота были успешно выполнены.

Санкт-Петербургское Морское собрание продолжает проводить мероприятия, посвященные 330-летию создания регулярного ВМФ России. ■

1. Автор представляет статью в электронном виде объемом до 20 000 знаков, включая рисунки. Текст набирается в редакторе MS Word под Windows, формулы – в формульном редакторе MathType. Иллюстрации, помещенные в статью, должны быть представлены дополнительно в форматах: TIFF CMYK (полноцветные), TIFF GRAYSCALE (полутонные), TIFF BITMAP (штриховые), EPS, JPEG, с разрешением 300 dpi для полутонных, 600 dpi для штриховых и в размерах, желательных для размещения.

2. Статья должна содержать реферат объемом до 300 знаков, ключевые слова и библиографо-библиотечный индекс УДК. Автор указывает ученую степень, ученое звание, место работы, должность и контактный телефон, а также дает в письменной форме разрешение редакции журнала на размещение статьи в Интернете и Научной электронной библиотеке после

публикации в журнале. Статья представляется с рецензией.

3. Статьи соискателей и аспирантов принимаются к публикации на бесплатной и безгонорарной основе.

4. Контрольное рецензирование этих статей осуществляет редакционная коллегия с привлечением при необходимости профильных специалистов. Рецензии на статьи хранятся в редакции журнала в течение 5 лет.

5. В случае отказа в публикации автору высылается рецензия. Копии рецензий направляются в Минобрнауки России при поступлении соответствующего запроса в редакцию журнала.

6. Содержание журнала ежеквартально представляется на рассмотрение редакционному совету. Решение о выпуске очередного номера оформляется протоколом.

РЕФЕРАТЫ

УДК 629.56, 626/627 **Ключевые слова:** самоотвозный земснаряд, самоотвозный трюмный землесос, дноуглубление, логистическая эффективность, технологический суверенитет, грузооборот морских бассейнов, Северный морской путь

С.Ю. Афанасьева, А.Н. Суслов. Концепция перспективного морского самоотвозного земснаряда для обеспечения его логистической эффективности//Морской вестник. 2026. № 3 (99). С. 7

Проанализированы грузообороты морских бассейнов России и маршруты между ними. Предложена концепция малого самоотвозного земснаряда, способного перемещаться между морскими бассейнами России по внутренним водным путям (ВВП). Показано, что использование ВВП сокращает время перегонов на 15–20%, а путь – более чем в 2 раза. Т. 6. Ил. 1. Библиогр. 29 назв.

УДК 629.12.014 **Ключевые слова:** мобильное спуско-подъемное устройство, буксируемый подводный аппарат, контейнерное исполнение, объект-носитель, техническое предложение

В.В. Болтенков, В.А. Игнашов, В.С. Христенко. Техническое предложение по созданию мобильного спуско-подъемного устройства для буксируемых подводных аппаратов в контейнерном исполнении//Морской вестник. 2026. № 3 (99). С. 13

Представлено техническое предложение по созданию мобильного спуско-подъемного устройства для буксируемых подводных аппаратов с сохранением их основных параметров для возможности его размещения на объектах-носителях без каких-либо доработок, а также транспортировки к месту базирования различными видами транспорта. Ил. 3.

УДК 004.925.83 **Ключевые слова:** поверхность корпуса судна, каркасно-кинематический метод, инструменты геометрического моделирования

Н.Ю. Часовников. Новые инструменты построения поверхности корпуса судна каркасно-кинематическим методом//Морской вестник. 2026. № 3 (99). С. 15

Рассмотрены систематизация и развитие инструментов построения поверхности корпуса судна на основе каркасно-кинематического метода. Предложена многоуровневая абстрактная модель (концептуальный, каркасно-кинематический, инструментальный, базовой геометрии и отображения). Показано, что существующие CAD-инструменты недостаточны для полного формализованного описания сложных судовых обводов. Т. 1. Ил. 6. Библиогр. 11 назв.

УДК 629.5.043 **Ключевые слова:** судно (корабль), обитаемость, жизнедеятельность, эргономика, аналитическая модель, техническая эстетика

П.А. Зубков, О.В. Захарова. Аналитическая модель оценки условий обитаемости экипажей и совершенствования эргономических характеристик жилых и служебных помещений перспективных надводных кораблей//Морской вестник. 2026. № 3 (99). С. 21

Разработана аналитическая модель, представляющая собой комплексный инструмент для оценки

и совершенствования условий обитаемости на перспективных надводных кораблях ВМФ России. Т. 3. Ил. 1. Библиогр. 10 назв.

УДК 621.791.05 **Ключевые слова:** соединение «шип-паз», оптимизация процесса сборки, ЧПУ, трудозатраты

В.Ю. Лисин, А.В. Жевлаков. Оптимизация процесса сборки сварных конструкций с применением соединений типа «шип-паз»//Морской вестник. 2026. № 3 (99). С. 27

Рассмотрен метод оптимизации процесса сборки сварных конструкций с применением соединений типа «шип-паз». Проанализированы конструктивные особенности и технологические преимущества данного метода. Проведено сравнение традиционного метода сборки и сборки с использованием соединения «шип-паз». Т. 1. Ил. 6. Библиогр. 10 назв.

УДК 004.4, 004.65, 004.67, 62 **Ключевые слова:** технология машиностроения, технологическое обеспечение, автоматизированное проектирование, технологические документы

Д.О. Глазырина, Е.Н. Алексин, Л.В. Гукова, Г.В. Николаев. Разработка методики автоматизированного формирования технологических маршрутов для изделий машиностроительного производства//Морской вестник. 2026. № 3 (99). С. 30

Проанализирована проблема высокой трудоемкости проектирования технологических процессов в условиях мелкосерийного и серийного производства. Ил. 1. Библиогр. 8 назв.

УДК 621.9.06 **Ключевые слова:** балансировка, вибрационная диагностика, узкополосный спектр вибрации, центровка шкивов, виброналадка

Д.Н. Семёнов, И.В. Кузнецов, Д.О. Гоглев. Алгоритм виброналадки вентиляционных установок с дефектами, ограничивающими качество балансировки//Морской вестник. 2026. № 3 (99). С. 35

Расходы на эксплуатацию электроприводов могут превышать стоимость нового оборудования. Представлены примеры наладки электровентиляторов. Технологические операции, снижающие вибрацию (виброналадка), в частности центровка, проверка боя вала, устранение дефектов рамы и рабочего колеса вентиляционной установки, позволяют успешно проводить операцию балансировки. Дан алгоритм виброналадки ВУ с клиноременной передачей. Т. 5. Ил. 10. Библиогр. 16 назв.

УДК 377.5:629.5:004.9 **Ключевые слова:** судостроение, среднее профессиональное образование, цифровая верфь, единая информационная модель судна, КОМПАС-3D, PLM, MDM, практико-ориентированное обучение, индустриальный партнер

И.В. Щербakov, А.В. Новиков, В.Е. Щербakov, Е.Н. Шелег, М.В. Васильевская, О.В. Юркина. Очертежа к единой информационной модели судна. Подготовка специалистов среднего звена для цифрового судостроения//Морской вестник. 2026. № 3 (99). С. 41

Рассмотрен совместный образовательный проект колледжа СПБГМТУ, ООО ПКБ «Петробалт» и АО «АС-КОН» по подготовке специалистов среднего звена для

цифрового судостроения. Определены направления развития пилотного проекта в сквозную образовательную программу для цифровых верфей и конструкторских бюро. Ил. 5. Библиогр. 12 назв.

УДК 621.436:621.438 **Ключевые слова:** методика обоснования, высокооборотные дизельные двигатели, скоростные катера, импортозамещение

А.В. Довличарова. Методика обоснования технико-экономических характеристик легких высокооборотных дизельных двигателей скоростных катеров ВМФ в условиях импортозамещения//Морской вестник. 2026. № 3 (99). С. 46

Представлена методика обоснования выбора технико-экономических характеристик легких высокооборотных дизельных двигателей скоростных катеров ВМФ в условиях импортозамещения. Т. 1. Ил. 1. Библиогр. 1

УДК 621.35 **Ключевые слова:** высокомоощный литий-ионный аккумулятор, конструкция и тип, электродные материалы, анализ технического уровня, методы расширения температурного диапазона

С.В. Зайцев, М.М. Барсукова, А.В. Ковальчук, М.Ю. Подалинский. Особенности создания высокомоощных литий-ионных аккумуляторов//Морской вестник. 2026. № 3 (99). С. 50

На основе опубликованных источников рассмотрены методы повышения моощных характеристик литий-ионных аккумуляторов. Приведены основные типы конструкции и типы электродных материалов, обеспечивающих работу аккумуляторов при повышенных плотностях токов разряда. Указаны методы расширения диапазона рабочих температур за счет оптимизации состава электролита. Т. 2. Ил. 12. Библиогр. 9 назв.

УДК 623.827 **Ключевые слова:** абсорбер, сатуратор, пузырьки, двуокись углерода, конверсионный газ, жидкость, температура, диффузия, коэффициент массоотдачи, коэффициент массопередачи, морской подводный объект, топливный процессор

А.В. Балакин, А.Н. Дядик, М.В. Ларионов, Д.С. Маловик. Определение характеристик абсорбера системы очистки газа//Морской вестник. 2026. № 3 (99). С. 55

Рассмотрена задача определения характеристик абсорбера для очистки водорода от углекислого газа, вредящего работе электрохимического генератора в морском подводном аппарате. Т. 1. Ил. 3. Библиогр. 6 назв.

УДК 623.973 **Ключевые слова:** постоянное магнитное поле корабля, размагничивающая обмотка, магнитный момент, система компенсации постоянного магнитного поля, датчик постоянного тока

Б.Ю. Семёнов. Автоматический эксплуатационный контроль направления вектора поля в системах компенсации магнитных полей корабельных корпусных конструкций//Морской вестник. 2026. № 3 (99). С. 59

Проанализирована типовая операция проверки направления токов в обмотках систем компенсации магнитного поля корабельных корпусных конструкций, в том числе эксплуатационные недостатки, связанные с последствиями ошибочных подключений обмоток

к источникам питания. Сформулированы предложения по разработке системы автоматического эксплуатационного контроля полярности подключения обмоток. Ил. 7.

УДК 621.822.187 **Ключевые слова:** дейдвудное устройство, дейдвудный подшипник, гребной вал, фрезерование пазов, электрошпиндель, опрессовка, технологическая оснастка, ремонт судовых валопроводов

В.В. Куц, А.А. Халаякин, А.И. Машенко, С.А. Шугаев, Д.Р. Зубков. Разработка специальной оправки для ремонта дейдвудных подшипников//Морской вестник. 2026. № 3 (99). С. 62

Рассмотрена задача высокоточного изготовления и восстановления продольных смазочных каналов и крепежных пазов типа «ласточкин хвост» в цилиндрических втулках дейдвудных подшипников судовых валопроводов. Показано, что предложенное решение обеспечивает требуемую точность пазов, сокращает время обработки и может быть реализовано на стандартном станочном парке судоремонтных предприятий. Т. 1. Ил. 10. Библиогр. 13 назв.

УДК 621.438 **Ключевые слова:** корабельная энергетическая установка, газотурбинный двигатель, дизель, редуктор, трехчленное уравнение масс, водоизмещение корабля, нагрузка масс, маршевый двигатель, форсажный двигатель, электрогенерирующая установка

М.Н. Буров, В.А. Пономарев. Метод выбора схемы корабельной энергетической установки на начальном этапе проектирования//Морской вестник. 2026. № 3 (99). С. 68

Описан метод оценки влияния типа главных двигателей, схемы и состава корабельной энергетической установки (ЭУ) на целевую эффективность корабля при исследовательском проектировании. В качестве критерия эффективности принята масса полезной нагрузки. Рассмотрены газотурбинные, дизельные и комбинированные главные ЭУ. Т. 9. Ил. 10. Библиогр. 12 назв.

УДК 621.396.22.029.7 **Ключевые слова:** автоматизированный комплекс связи, оператор, автоматизированный контроль, прогнозирование отказов, модели машинного обучения, отказ средств связи, производительность

А.А. Катанович, К.В. Гольдибаев, А.В. Сорокин, В.А. Цыванюк. Один из подходов прогнозирования времени отказа элементов корабельного автоматизированного комплекса связи ВМФ//Морской вестник. 2026. № 3 (99). С. 79

Предложены модели машинного обучения для предсказания отказов корабельного автоматизированного комплекса связи, рассмотрены их ключевые особенности. Сравнение моделей машинного обучения для предсказания отказов средств может быть выполнено на основе различных метрик оценки качества моделей и их производительности. Ил. 2. Библиогр. 4 назв.

УДК 681.2.08:658.562 **Ключевые слова:** цифровой двойник, измерительное оборудование, метрологическое обеспечение серийного производства, калибровка по состоянию, цифровой контур предприятия

Е.А. Рылов, А.В. Долгов, К.В. Яшин. Метрологический цифровой двойник как инструмент автоматизации контроля средств измерений в условиях серийного выпуска продукции//Морской вестник. 2026. № 3 (99). С. 83

Статья посвящена разработке архитектурных решений и методических приемов, позволяющих реализовать автоматизированный контроль состояния средств измерений с использованием технологий цифровых двойников применительно к специфике серийного производства. Библиогр. 9 назв.

УДК 539.219.3 **Ключевые слова:** взаимная диффузия, контакты Si-Al, промежуточные

металлические слои, диффузионный барьер, силициды, тугоплавкие металлы и нитриды, многослойные структуры, надежность металлизации

А.И. Назмиев. Роль промежуточных металлических слоев в управлении взаимной диффузией в системах Si-Al//Морской вестник. 2026. № 3 (99). С. 85

Работа посвящена анализу роли промежуточных металлических и силицидных слоев в подавлении взаимной диффузии в системах Si-Al. Отмечено, что многослойные, наноструктурированные и высокоэнтропийные барьеры являются перспективным инструментом повышения надежности и термостойкости контактов Si-Al в современной электронике. Библиогр. 16 назв.

УДК 621.391 **Ключевые слова:** затухание сигналов, радиолонии ОВЧ-диапазона, режим низкоподнятых антенн, составные радиолонии морской подвижной радиосвязи

Е.В. Демин, С.В. Дворников, Д.В. Васильева. Оценка затухания в составных радиолониях морской подвижной радиосвязи//Морской вестник. 2026. № 3 (99). С. 87

Представлен разработанный аналитический аппарат для оценки уровня затухания в радиолониях морской подвижной радиосвязи ОВЧ диапазона. Т. 1. Ил. 4. Библиогр. 21 назв.

УДК 621.396.674.3 **Ключевые слова:** антенна УКВ, симметричный вибратор, частотный диапазон, коэффициент усиления, коэффициент стоячей волны

А.Ю. Степкин, В.О. Миротворский. Расширение частотного диапазона УКВ антенны К-674–11Б для надводных кораблей и радиопередатчиков//Морской вестник. 2026. № 3 (99). С. 91

Показана разработка новых исполнений изделия К-674–11Б. В основу положено техническое решение по созданию вертикального симметричного вибратора с шунтом и спиральным коаксиальным фидером. Из рассмотрения параметров исходной антенны и разработанной антенны с расширенным частотным диапазоном очевиден положительный эффект. Ил. 4. Библиогр. 1 назв.

УДК 621.3.049.75::621.793 **Ключевые слова:** металлизация печатных плат, струйный метод металлизации, струйное электроосаждение

Ф.А. Баракоский. Моделирование процесса высокоскоростного электроосаждения//Морской вестник. 2026. № 3 (99). С. 94

Представлено экспериментальное исследование процесса высокоскоростного струйного электроосаждения меди на поверхности печатных плат. Предложена аналитическая модель, учитывающая параметры скорости струи, радиуса сопла, времени осаждения и распределения профиля скоростей в потоке. Ил. 13. Библиогр. 8 назв.

УДК 623.8.9 **Ключевые слова:** ЭНИС, МСН, ВМФ, Astra Linux, навигация, маневренный планшет, расхождение с целями

Л.С. Хабаров. Программный модуль обеспечения безопасного расхождения кораблей (судов) с целями в ЭНИС нового поколения на отечественной операционной системе Astra Linux//Морской вестник. 2026. № 3 (99). С. 101

Описаны разработки программного модуля обеспечения безопасного расхождения кораблей (судов) с целями и проведен анализ на предмет его применения. Приведены технические подробности реализации модуля в ЭНИС и его структура. Ил. 3. Библиогр. 2 назв.

УДК 629.5.05, 004.93, 004.383 **Ключевые слова:** маломерное автономное судно, обнаружение объектов, датчик, микроконтроллер, встраиваемое программное обеспечение

А.Е. Васильев, Д.Е. Голубева, Д.А. Знаменский, В.А. Карпенко, В.Д. Ковалев. Подсистема обнаружения

объектов на водной поверхности для экспериментального маломерного автономного судна//Морской вестник. 2026. № 3 (99). С. 103

Рассмотрены принципы построения и применения аппаратно-программных средств, предназначенных для регистрации плавучих объектов, находящихся вблизи безэкипажных судов. Приведен пример практической реализации варианта такого средства, характеризующегося низкими требованиями к вычислительной производительности бортового вычислительного устройства. Ил. 3. Библиогр. 7 назв.

УДК 551.468 **Ключевые слова:** судовая энергетическая установка, нефть, нефтеразлив, загрязнение, последствия, модель

В.Р. Долгомирова, Г.В. Черкаев, Ю.Ю. Злобина, А.И.Н. Мханна. Обоснование необходимости создания комплексной модели для прогнозирования разливов нефтепродуктов//Морской вестник. 2026. № 3 (99). С. 105

Рассмотрены причины и источники нефтяных загрязнений, а также масштабы нефтяных разливов. Дана оценка экологическим последствиям нефтяных разливов, таких как загрязнение окружающей среды и экономические потери. Проанализированы модели прогнозирования распространения нефти и нефтепродуктов при разливе на морских акваториях. Т. 1. Ил. 3. Библиогр. 29 назв.

УДК 004.94:681.5 **Ключевые слова:** сложные технические системы, автоматическая категоризация, большая языковая модель, иерархическая навигация по документу, цифровые инструменты, управление испытаниями, замечания комиссии

В.В. Ровник. Методика и алгоритм классификации замечаний к сложным техническим системам для цифровизации испытаний с использованием элементов искусственного интеллекта//Морской вестник. 2026. № 3 (99). С. 110

Рассмотрена задача автоматической категоризации замечаний, содержащихся в материалах испытаний сложных технических систем. Практическая значимость подхода заключается в снижении нагрузки на инженеров, ускорении маршрутизации замечаний и формировании базы знаний для новых проектов. Ил. 1. Библиогр. 7 назв.

УДК 623.624 **Ключевые слова:** различение, селекция, объект назначения, облако дипольных отражателей, отличительный признак, число обнаружений, выборочная дисперсия интенсивности эхосигналов, распределения χ^2 и Снедекора, полнота и точность отображения морского группового объекта.

О.Г. Мальцев. Различение истинных и ложных целей на основе их упорядочения по отличительному признаку//Морской вестник. 2026. № 3 (99). С. 113

Исследованы решающие правила различения истинных и ложных объектов – селекции объектов назначения от облаков дипольных отражателей – бортовой РЛС управляемого средства. Решающие правила основаны на упорядочении обнаруженных объектов по их отличительному признаку – «число обнаружений» или «выборочная дисперсия интенсивности эхосигналов». Т. 2. Ил. 1. Библиогр. 13 назв.

УДК 532.582 **Ключевые слова:** радиолокационный комплекс, морское судно, точность измерения

Е.К. Самаров, Я.Ю. Ионченкова. Использование береговой радиолокационной станции для измерения волнообразующих свойств морских судов//Морской вестник. 2026. № 3 (99). С. 120

В работе всесторонне исследуются теоретические и практические аспекты построения и функционирования измерительного комплекса, созданного на базе современной береговой РЛС и стандартных вычислительных средств, обеспечивающих последующую обработку и интерпретацию получаемых данных. Ил. 3. Библиогр. 14 назв.

1. Authors shall submit articles of up to 20,000 characters, including figures, in electronic form. The text shall be typed in MS Word under Windows, formulas – in the equation editor «MathType.» Illustrations present in the article shall be submitted additionally, in the following formats: TIFF CMYK (full color), TIFF GRAYSCALE (grayscale), TIFF BITMAP (dashed), EPS, JPEG, with resolution of 300 dpi for grayscale figures and 600 dpi for dashed ones and in sizes desired for placement.

2. Articles shall contain an abstract of up to 300 characters, keywords, and bibliographic library UDC identifier. Authors shall indicate their degree, academic status, place of employment, job position, and telephone number, as well as provide a written permission of the Editor to place articles on the Internet and in the Scientific Electronic Library after publication in the journal. Articles shall be submitted with reviews.

3. The articles of postgraduate and degree-seeking students shall be accepted for publication on a free and royalty-free basis.

4. The control review of these articles shall be performed by the editorial board, with the assistance of dedicated experts, if necessary. Reviews of articles are stored in editorial office of the magazine within 5 years.

5. In case of refusal to publish articles, reviews shall be sent to authors. Copies of reviews go to the Ministry of Education and Science of the Russian Federation at receipt of the corresponding inquiry in editorial office of the magazine.

6. The contents of the journal shall be submitted to the editorial board quarterly. The decision concerning the next issue of the journal shall be formally established with the protocol.

ABSTRACTS

UDC 629.56, 626/627 **Keywords:** hopper dredger, hopper suction hopper dredger, dredging, logistics efficiency, technological sovereignty, cargo turnover of marine basins, Northern Sea Route, Russian marine basins

S. Yu. Afanas'eva, A. N. Suslov. Concept of a promising marine hopper dredger to ensure their logistical efficiency//Morskoy vestnik. 2026. No. 3 (99). P. 7

The cargo turnover of Russia's marine basins and the routes between them are analyzed. A concept for a small hopper dredger capable of navigating between Russia's marine basins via inland waterways (IWW) is proposed. It is shown that the use of IWW reduces transit time by 15–20%, and the route by more than 2 times. T. 6. Fig. 1. Bibliography 29 titles.

UDC 629.12.014 **Keywords:** mobile launching and recovery device, towed underwater vehicle, containerized design, carrier, technical proposal

V.V. Boltenkov, V.A. Ignashov, V.S. Khristenko. Technical proposal for the creation of a mobile launching and recovery device for towed submarines in a container design//Morskoy vestnik. 2026. No. 3 (99). P. 13

This paper presents a technical proposal for the development of a mobile launching and recovery device (MLRD) for towed underwater vehicles (TUVs), preserving their basic parameters to ensure the possibility of its placement on carriers without any modifications, as well as transportation to the base by various modes of transport. The use of this device will significantly expand the geographic reach, functionality, and efficiency of underwater exploration, search and survey, and other operations. Fig. 3.

UDC 004.925.83 **Keywords:** ship hull surface, frame-kinematic method, geometric modeling tools

N. Yu. Chasovnikov. New tools for constructing ship hull surfaces using the frame-kinematic method//Morskoy vestnik. 2026. No. 3 (99). P. 15

The article considers the systematization and development of tools for constructing ship hull surfaces using the frame-kinematic method. A multi-level abstract model (conceptual, frame-kinematic, instrumental, basic geometry, and display) is proposed. It is shown that existing CAD tools are insufficient for a complete formalized description of complex ship contours. Two new tools for constructing spatial curves are described: offset relative to a base curve with a variable angle and distance, and construction of a curve on a ruled surface between two base curves with a variable displacement. T. 1. Fig. 6. Bibliography 11 titles.

UDC 629.5.043 **Keywords:** vessel(ship), habitability, life support, ergonomics, analytical model, technical aesthetics

P.A. Zubkov, O.V. Zakharova. An analytical model for assessing crew living conditions and improving the ergonomic characteristics of living and service spaces on prospective surface ships//Morskoy vestnik. 2026. No. 3 (99). P. 21

An analytical model has been developed, represent-

ing a comprehensive toolkit for assessing and improving habitability conditions on prospective surface ships of the Russian Navy. The use of the model at all stages of the ship's life cycle helps create comfortable and safe conditions for the crew, which directly impacts the ship's combat effectiveness and mission efficiency. T. 3. Fig. 1. Bibliography 10 titles.

UDC 621.791.05 **Keywords:** tongue-and-groove joint, assembly process optimization, CNC, labor costs

V. Yu. Lisin, A.V. Zhevlakov. Optimization of the welding process using tongue-and-groove joints//Morskoy vestnik. 2026. No. 3 (99). P. 27

This article examines a method for optimizing the assembly process of welded structures using tongue-and-groove joints. The design features and technological advantages of this method are analyzed. A comparison is made between the traditional assembly method and assembly using a tongue-and-groove joint. T. 1. Fig. 6. Bibliography 10 titles.

UDC 004.4, 004.65, 004.67, 62 **Keywords:** mechanical engineering technology, technologist, software, computer-aided design, process documentation

D.O. Glazyrina, E.N. Alekzin, L.V. Gukova, G.V. Nikolaev. Development of a methodology for the automated generation of process routings for mechanical engineering products//Morskoy vestnik. 2026. No. 3 (99). P. 30

The article discusses the problem of high labor intensity of designing technological processes (TP) in conditions of small-scale and serial production. Fig. 1. Bibliography 8 titles.

UDC 621.9.06 **Keywords:** balancing, vibration diagnostics, narrowband vibration spectrum, pulley alignment, vibration adjustment

D.N. Semyonov, I.V. Kuznetsov, D.O. Goglev. Algorithm for vibration adjustment of ventilation units with defects limiting balancing quality//Morskoy vestnik. 2026. No. 3 (99). P. 35

The operating costs of electric drives can exceed the cost of new equipment. Examples of electric fan adjustments are presented. Technological operations that reduce vibration (vibration adjustment), in particular alignment, shaft play check, and frame and impeller defect elimination in air handling units, enable successful balancing. References to regulatory documents on vibration control of radial centrifugal air handling units and air handling units with V-belt drives, as well as signs of air handling unit defects, are provided. An algorithm for vibration adjustment of V-belt-driven air handling units is provided. T. 5. Fig. 10. Bibliography 16 titles.

UDC 377.5:629.5:004.9 **Keywords:** shipbuilding, secondary vocational education, digital shipyard, unified vessel information model, KOMPAS-3D, PLM, MDM, practice-oriented training, industrial partner

I.V. Shcherbakov, A.V. Novikov, V.E. Shcherbakov, E.N. Sheleg, M.V. Vasilevskaya, O.V. Yurkina. From drawing to a unified vessel information model. Training mid-level specialists for digital shipbuilding//Morskoy vestnik. 2026. No. 3 (99). P. 41

The article presents a joint educational project of the College of St. Petersburg State Marine Technical University, Petrobalt Design Bureau and ASCON for training mid-level specialists in digital shipbuilding. The 3D «Spasatel» project combines industry-specific training, real design documentation, KOMPAS-3D modelling and additive manufacturing. Directions for developing the pilot into an integrated educational program for digital shipyards and design bureaus are outlined. Fig. 5. Bibliography 12 titles.

UDC 621.436:621.438 **Keywords:** justification methodology, high-speed diesel engines, high-speed boats, import substitution

A.V. Dovlicharova. Methodology for justifying the technical and economic characteristics of light high-speed diesel engines for navy high-speed boats in the context of Import substitution//Morskoy vestnik. 2026. No. 3 (99). P. 46

This article presents a methodology for justifying the selection of technical and economic characteristics of light high-speed diesel engines for Navy high-speed boats in the context of import substitution. T. 1. Fig. 1. Bibliography 1 title.

UDC 621.35 **Keywords:** high-power lithium-ion battery, design and type, electrode materials, technical level analysis, methods for expanding the temperature range

S.V. Zaitsev, M.M. Barsukova, A.V. Koval'chuk, M.Yu. Podalinsky. Features of the creation of high-power lithium-ion batteries//Morskoy vestnik. 2026. No. 3 (99). P. 50

Based on published sources, methods for increasing the power characteristics of lithium-ion batteries are considered. The main design types and types of electrode materials that ensure battery operation at increased discharge current densities are presented. Methods for expanding the operating temperature range by optimizing the electrolyte composition are indicated. T. 2. Fig. 12. Bibliography 9 titles.

UDC 623.827 **Keywords:** absorber, saturator, absorption, bubble, carbon dioxide, conversion gas, liquid, temperature, diffusion, mass transfer coefficient, mass transfer coefficient, underwater marine facility (USF), fuel processor

A.V. Balakin, A.N. Dyadik, M.V. Larionov, D.S. Malovik. Determining the characteristics of a gas purification system absorber//Morskoy vestnik. 2026. No. 3 (99). P. 55

This article considers the problem of determining the characteristics of an absorber for purifying hydrogen from carbon dioxide, which is detrimental to the operation of an electrochemical generator in an underwater vehicle. Calculations for three values of liquid volumetric flow rate demonstrated the possibility of complete dissolution of the incoming carbon dioxide flow rate in the liquid circulating in the absorber volume. T. 1. Fig. 3. Bibliography 6 titles.

UDC 623.973 **Keywords:** ship's constant magnetic field, demagnetizing winding, magnetic moment, constant magnetic field compensation system, DC sensor

B.Yu. Semyonov. Automatic operational monitoring of the direction of the field vector in magnetic field compen-

sation systems of ship hull structures//*Morskoy Vestnik*. 2026. No. 3 (99). P. 59

This article analyzes a typical operation for checking the direction of currents in the windings of magnetic field compensation systems of ship hull structures, including operational deficiencies associated with the consequences of incorrect winding connections to power sources. Proposals are formulated for the development of a system for automatic operational monitoring of winding connection polarity. Fig. 7.

UDC 621.822.187 **Keywords:** stern-tube device, stern-tube bearing, propeller shaft, groove milling, electric spindle, mandrel, tooling, marine propeller shaft repair

V.V. Kuts, A.A. Khalyavkin, A.I. Mashchenko, S.A. Shugaev, D.R. Zubkov. Development of a special mandrel for repairing stern-tube bearings//*Morskoy vestnik*. 2026. No. 3 (99). P. 62

This article examines the problem of high-precision manufacturing and restoration of longitudinal lubrication channels and dovetail mounting grooves in cylindrical bushings of stern-tube bearings of marine propeller shafts. It is demonstrated that the proposed solution ensures the required groove accuracy, reduces machining time, and can be implemented using standard ship repair facility machinery. T. 1. Fig. 10. Bibliography 13 titles.

UDC 621.438 **Keywords:** marine propulsion plant, gas turbine engine, diesel engine, gearbox, three-term mass equation, ship displacement, mass loading, cruise engine, afterburner engine, electric generator

M.N. Burov, V.A. Ponomarev. Method for selecting a marine propulsion plant layout at the initial design stage//*Morskoy vestnik*. 2026. No. 3 (99). P. 68

This paper describes a method for assessing the impact of the main engine type, layout, and composition of a marine propulsion plant on the target ship performance during research design. The payload mass is used as the performance criterion. Gas turbine, diesel, and combined main propulsion plants are considered. T. 9. Fig. 10. Bibliography 12 titles.

UDC 621.396.22.029.7 **Keywords:** automated communications complex, communications complex operator, automated control, failure prediction, machine learning models, communication equipment failure, performance

A.A. Katanovich, K.V. Gol'dibaev, A.V. Sorokin, V.A. Tsyvanyuk. One of the approaches to predicting the failure time of elements of the naval automated Shipborne communications complex//*Morskoy vestnik*. 2026. No. 3 (99). P. 79

Machine learning models for predicting failures of shipboard automated communication systems are proposed, and their key features are discussed. Machine learning models for predicting system failures can be compared using various metrics for assessing model quality and performance. Fig. 2. Bibliography 4 titles.

UDC 681.2.08:658.562 **Keywords:** digital twin, measuring equipment, metrological support for serial production, condition-based calibration, enterprise digital contour

E.A. Rylov, A.V. Dolgov, K.V. Yashin. Metrological digital twin as a tool for automating the control of measuring instruments in serial production conditions//*Morskoy vestnik*. 2026. No. 3 (99). P. 83

This article is devoted to the development of architectural solutions and methodological techniques enabling the implementation of automated condition monitoring of measuring instruments using digital twin technology as applied to the specifics of serial production. Bibliography 9 titles.

UDC 539.219.3 **Keywords:** interdiffusion, Si-Al contacts, intermediate metal layers, diffusion barrier, silicides, refractory metals and nitrides, multilayer structures, metallization reliability

A.I. Nazmiev. The role of intermediate metal layers in controlling interdiffusion in Si-Al systems//*Morskoy vestnik*. 2026. No. 3 (99). P. 85

This paper analyzes the role of intermediate metal and silicide layers in suppressing interdiffusion in Si-Al systems. It is noted that multilayer, nanostructured, and high-entropy barriers are a promising tool for increasing the reliability and thermal stability of Si-Al contacts in modern electronics. Bibliography 16 titles.

UDC 621.391 **Keywords:** signal attenuation, VHF radio links, low-elevation antenna mode, composite radio links of maritime mobile radio communications

E.V. Demin, S.V. Dvornikov, D.V. Vasil'eva. Attenuation assessment in composite marine mobile radio links//*Morskoy vestnik*. 2026. No. 3 (99). P. 87

The article presents an analytical tool for assessing the attenuation level in VHF marine mobile radio links. Calculated expressions for the dependence of signal attenuation on the communication range along marine paths for various frequency values are obtained. Recommendations for the practical application of the obtained results are developed. T. 1. Fig. 4. Bibliography 21 titles.

UDC 621.396.674.3 **Keywords:** VHF antenna, symmetrical dipole, frequency range, gain, standing wave ratio

A.Yu. Stepkin, V.O. Mirotvorsky. Expanding the frequency range of the K-674-11B VHF antenna for surface ships and radio centers//*Morskoy vestnik*. 2026. No. 3 (99). P. 91

This article presents the development of new versions of the K-674-11B antenna. The development was based on a technical solution for creating a vertical symmetrical dipole with a shunt and a helical coaxial feeder. A comparison of the parameters of the original antenna and the developed antenna with an extended frequency range reveals a positive effect. Fig. 4. Bibliography 1 title.

UDC 621.3.049.75::621.793 **Keywords:** printed circuit board metallization, inkjet metallization method, inkjet electrodeposition

F.A. Barakovskiy. Modeling of the high-speed electrodeposition process//*Morskoy vestnik*. 2026. No. 3 (99). P. 94

This paper presents an experimental study of the high-speed inkjet electrodeposition of copper on the surface of printed circuit boards. An analytical model is proposed that takes into account the parameters of the jet velocity, nozzle radius, deposition time, and the distribution of the velocity profile in the flow. The developed model can be used to accurately predict metallization parameters during the additive formation of microstructures and for further study of the influence of electrodynamic and kinetic factors in inkjet technologies. Fig. 13. Bibliography 8 titles.

UDC 623.8/9 **Keywords:** ENIS, MSN, Navy, Astra Linux, navigation, maneuverable tablet, target divergence

L.S. Khabarov. Software module for ensuring safe ship (vessel) target alignment in a new-generation ENIS on the domestic astra linux operating system//*Morskoy vestnik*. 2026. No. 3 (99). P. 101

This article describes the development of a software module for ensuring safe ship (vessel) target divergence and analyzes its application. Technical details of the module's implementation in the ENIS and its structure are provided. Fig. 3. Bibliography 2 titles.

UDC 629.5.05, 004.93, 004.383 **Keywords:** small-size autonomous vessel, object detection, sensors, microcontroller, embedded software

A.E. Vasil'ev, D.E. Golubeva, D.A. Znamensky, V.A. Karpenko, V.D. Kovalev. Water surface object detection subsystem for an experimental small-size autonomous vessel//*Morskoy vestnik*. 2026. No. 3 (99). P. 103

This article examines the design and application principles of embedded devices to detect floating objects

near unmanned vessels. A practical example of such system implementation, characterized by low computation requirements for the embedded microcontroller, is provided. Fig. 3. Bibliography 7 titles.

UDC 551.468 **Keywords:** ship propulsion plant, oil, oil spill, pollution, consequences, model

V.R. Dolgomirova, G.V. Cherkaev, Yu.Yu. Zlobina, A.I.N. Mhanna. Justification of the need to create a comprehensive model for forecasting oil product spills//*Morskoy vestnik*. 2026. No. 3 (99). P. 105

The article examines the causes and sources of oil pollution, as well as the scale of oil spills. An assessment of the environmental consequences of oil spills, such as environmental pollution and economic losses, is provided. Models for predicting the spread of oil and oil products during spills in marine waters are analyzed. T. 1. Fig. 3. Bibliography 29 titles.

UDC 004.94:681.5 **Keywords:** complex technical systems, commission comments, automatic categorization, large language models, hierarchical document navigation, digital tools, and test management

V.V. Rovnik. Methodology and algorithm for classifying comments on complex technical systems for digitalization of tests using elements of artificial intelligence//*Morskoy vestnik*. 2026. No. 3 (99). P. 110

The article discusses the task of automatic categorization of comments contained in test reports, technical solutions, and other documents on testing complex technical systems. It is shown that the short volume of comments, high terminological variability, lack of a labeled training set, and variability of the category dictionary limit the applicability of traditional machine learning methods. A hierarchical navigation method is proposed, in which a large language model performs step-by-step navigation. Fig. 1. Bibliography 7 titles.

UDC 623.624 **Keywords:** differentiation, selection, object of destination, cloud of chaff dipoles, discriminating characteristic, quantity of detection, sample variance of the intensity of echo-signals, χ^2 and Snedecor's distributions, fullness and accuracy of mapping of the sea multiple object

O.G. Mal'tsev. Differentiation of true and false targets based on the their ranging on discriminating characteristic//*Morskoy vestnik*. 2026. № 3 (99). P. 113

The decision rules of differentiation of true and false objects – of selection of destination objects from cloud of chaff dipoles – by airborne radar of controllable vehicle are investigated. The decision rules are based on the ranging of the detected objects on their discriminating characteristic – «quantity of detection «or» sample variance of the intensity of echo-signals». It gives the estimation of decision rules of a selection by use of the criteria of fullness and accuracy of mapping of the sea multiple object. T. 2. Fig. 1. Bibliography 13 titles.

UDC 532.582 **Keywords:** radar system, marine vessel, measurement accuracy

E.K. Samarov, Ya.Yu. Ionchenkova. Application of a coastal radar station for measuring wave-forming properties of marine vessels//*Morskoy vestnik*. 2026. № 3 (99). P. 120

The presented work comprehensively studies the theoretical and practical aspects of the construction and functioning of a measuring complex based on a modern coastal radar station and standard computing tools that provide subsequent processing and interpretation of the obtained data. The paper provides a detailed analysis of the principles of radar equipment operation, the features of radar image formation in the water area, and the factors affecting the quality and stability of measurements when observing sea waves caused by the movement of various types of marine vessels. Fig. 3. Bibliography 14 titles.