

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

ВЕСТНИК

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

Том 18. № 1

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

**САНКТ-ПЕТЕРБУРГ
2026**



Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — СПб. : ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова, 2026. — Т. 18. — № 1. — 164 с.

ISSN (print) 2309-5180

ISSN (online) 2500-0551

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

В «Вестнике» публикуются материалы оригинальных научных исследований и основных результатов диссертационных работ на соискание ученой степени доктора и кандидата наук по основным группам специальностей в соответствии с Номенклатурой специальностей научных работников:

2.5.19 «Технология судостроения, судоремонта и организация судостроительного производства (технические науки);»

2.5.20 «Судовые энергетические установки и их элементы (главные и вспомогательные) (технические науки);»

2.3.3 «Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами (технические науки);»

2.9.7 «Эксплуатация водного транспорта, водные пути сообщения и гидрография (технические науки).

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

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

Индекс для подписки в каталоге агентства «Урал-Пресс» — 37276.

Учредитель и издатель

Федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего образования
**«ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ МОРСКОГО И РЕЧНОГО ФЛОТА
имени адмирала С. О. Макарова»**

Адрес учредителя и издателя

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

Адрес редакции

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

e-mail: journal@gumrf.ru

http://journal.gumrf.ru

ISSN 2309-5180



© Государственный университет морского и речного
флота имени адмирала С. О. Макарова, 2026

Гл. редактор

С. О. Барышников
д-р техн. наук, проф.

Зам. гл. редактора

А. П. Нырков
д-р техн. наук, проф.

Члены
редакционной
коллегии:

А. Е. Сазонов
д-р техн. наук, проф.,
чл.-кор. РАН

О. К. Безюков,
д-р техн. наук, проф.

А. Т. Беккер,
д-р техн. наук, проф.

Н. И. Ватин,
д-р техн. наук, проф.

П. А. Гарибин,
д-р техн. наук, проф.

Д. П. Голоскоков,
д-р техн. наук, проф.

**ЭКСПЛУАТАЦИЯ ВОДНОГО ТРАНСПОРТА, ВОДНЫЕ ПУТИ
СООБЩЕНИЯ И ГИДРОГРАФИЯ 7**

Беляков П. В., Ржаковская П. С., Конопацкий С. В. Оценка влияния
разработки карьеров на судоходные условия в нижнем бьефе
Чебоксарского гидроузла 7

Рослякова О. В., Кофеев В. Н., Черенович А. С. Предварительная
обработка результатов испытаний малого ленточного
гидродинамического якоря 18

Дерябин В. В. Оценка быстродействия нейросетевого алгоритма
определения широты судна по глубине 26

Жук А. С., Мироненко А. А. Градиентный подход к формализации
дистанции кратчайшего сближения в задаче расхождения судов 38

Логиновский В. А. Байесовские сети доверия как инструмент анализа
безопасности мореплавания с учетом человеческого фактора 49

Изотов О. А., Полуботко Н. С. Принятие решения о перевалке
насыпных грузов через контейнерный терминал на основе
системного подхода 60

Антонов А. А., Артемьев А. В., Куценко В. А. Экспериментальное
исследование гидродинамического лага нового типа 68

Агеев С. А., Каретников В. В., Рудых С. В. К вопросу определения
расчетного судоходного уровня на внутренних водных путях 77

**ТЕХНОЛОГИЯ СУДОСТРОЕНИЯ, СУДОРЕМОНТА
И ОРГАНИЗАЦИЯ СУДОСТРОИТЕЛЬНОГО ПРОИЗВОДСТВА 84**

Цветков Ю. Н., Прокошев Д. О., Мильрат А. В. Возможность применения
метода испытаний дизелей проворачиванием коленчатого вала
от постороннего источника энергии для оценки трения поршневых
колец 84

Мосейко Е. С., Ольховик Е. О. Исследование подходов повышения
технологичности строительства судов типа плавучие энергоблоки 98

Живлюк Г. Е., Петров А. П. Основные направления и перспективы
развития судовых двухтактных крейцкопфных малооборотных
двигателей 112

Издание зарегистрировано в Федеральной службе по надзору в сфере связи,
информационных технологий и массовых коммуникаций
Свидетельство о регистрации СМИ ПИ № ФС 77-54734 от 17 июля 2013 года

Подписка на журнал осуществляется онлайн на сайте «Урал-Пресс»
www.ural-press.ru/catalog/98131/8994732 (подписной индекс — 37276)

Все материалы, поступившие в редакцию, рецензируются

В. Л. Ерофеев,
д-р техн. наук, проф.

В. А. Жуков,
д-р техн. наук, доц.

Ю. М. Искандеров,
д-р техн. наук, проф.

В. В. Каретников,
д-р техн. наук, доц.

А. В. Кириченко,
д-р техн. наук, проф.

М. Н. Кирсанов,
д-р физ.-мат. наук, проф.

Е. А. Королева,
д-р экон. наук, проф.

И. И. Костылев,
д-р техн. наук, проф.

А. Л. Кузнецов,
д-р техн. наук, проф.

В. А. Логиновский,
д-р техн. наук, проф.

А. В. Макианов,
д-р техн. наук, проф.

В. Е. Марлей,
д-р техн. наук, проф.

Т. А. Пантина,
д-р экон. наук, проф.

В. И. Решняк,
д-р техн. наук, проф.

А. В. Саушев,
д-р техн. наук, доц.

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

С. С. Соколов,
д-р техн. наук, доц.

М. В. Сухотерин,
д-р техн. наук, доц.

А. Л. Тезиков,
д-р техн. наук, проф.

А. А. Чертков,
д-р техн. наук, доц.

СУДОВЫЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ УСТАНОВКИ И ИХ ЭЛЕМЕНТЫ (ГЛАВНЫЕ И ВСПОМОГАТЕЛЬНЫЕ) 128

Афанасьева О. В. Метод комплексной оценки технического состояния
судовых дизельных двигателей с использованием многомерного
анализа 128

АВТОМАТИЗАЦИЯ И УПРАВЛЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ПРОЦЕССАМИ И ПРОИЗВОДСТВАМИ 139

Тындыкарь Л. Н. Интеллектуальная система диагностики судовых
технических средств с использованием методов модовой декомпозиции
и машинного обучения 139

Искандеров Ю. М., Буцанец А. А., Шаркова В. П. Интеллектуальная
поддержка мониторинга транспортно-логистических услуг
в интегрированных цепях поставок на основе риск-менеджмента 152

CONTENTS

OPERATION OF WATER TRANSPORT, WATERWAYS AND HYDROGRAPHY7

- Belyakov P. V., Rzhakovskaya P. S., Konopatsky. S. V.* Assessment of the impact of quarrying on navigable conditions in downstream of the Cheboksary hydroelectric complex7
- Roslyakova O. V., Kofeev V. N., Chrenovich. A. S.* Preliminary processing of the test results of the small belt hydrodynamic anchor18
- Deryabin Victor V.* Assessment of calculation performance of a neural network-based algorithm for bathymetric prediction of vessel latitude26
- Zhuk A. S., Mironenko. A. A.* Gradient-based approach to formalizing the distance at the closest point of approach for ship collision avoidance problem38
- Loginovsky V. A.* Bayesian belief networks as a tool for analyzing maritime safety taking into account the human factor49
- Izotov O. A., Polubotko. N. S.* Making a decision on the transshipment of bulk cargoes through a container terminal based on a systematic approach60
- Antonov A. A., Artemiev A. V., Kutsenko V. A.* Experimental study of a new type of hydrodynamic log68
- Ageev S. A., Karetnikov V. V., Rudykh. S. V.* On the issue of determining the estimated navigable level on inland waterways77

TECHNOLOGY OF SHIPBUILDING, SHIP REPAIR AND ORGANIZATION OF SHIPBUILDING PRODUCTION84

- Tsvetkov Y. N., Prokoshev D. O., Mil'rat. A. V.* About possibility of using the method of diesel cranking with external power source to evaluate the friction of piston rings84
- Moseiko E. S., Olkhovik. E. O.* Research approaches to improving the technological efficiency of construction of vessels of the floating power unit type98
- Zhivljuk G. E., Petrov. A. P.* Main directions and prospects for the development of marine two-stroke cross-head low-speed engines112

Volume 18. № 1

2026

EDITORIAL BOARD

S. O. Baryshnikov
Doctor of Technical Sciences

Deputy Editor-in-Chief
A. P. Nyrkov
Doctor of Technical Sciences

Members of the editorial board:

A. Ye. Sazonov
Doctor of Technical Sciences,
Prof.,
corresponding member
of the Russian Academy
of Sciences

O. K. Bezyukov,
Doctor of Technical Sciences

A. T. Bekker,
Doctor of Technical Sciences

N. I. Vatin,
Doctor of Technical Sciences

P. A. Garibin,
Doctor of Technical Sciences

D. P. Goloskokov,
Doctor of Technical Sciences

V. L. Erofeev,
Doctor of Technical Sciences

V. A. Zhukov,
Doctor of Technical Sciences

V. V. Karetnikov,
Doctor of Technical Sciences

A. V. Kirichenko,
Doctor of Technical Sciences

M. N. Kirsanov,
Doctor of Phys.-Math. Sciences

E. A. Koroleva,
Doctor of Economic Sciences

I. I. Kostylev,
Doctor of Technical Sciences

A. L. Kuznetsov,
Doctor of Technical Sciences

V. A. Loginovskiy,
Doctor of Technical Sciences

A. V. Makshanov,
Doctor of Technical Sciences

V. Ye. Marley,
Doctor of Technical Sciences

T. A. Pantina,
Doctor of Economic Sciences

V. I. Reshnyak,
Doctor of Technical Sciences

A. V. Saushev,
Doctor of Technical Sciences

S. V. Smolentsev,
Doctor of Technical Sciences

S. S. Sokolov,
Doctor of Technical Sciences

M. V. Sukhoterin,
Doctor of Technical Sciences

A. L. Tezikov,
Doctor of Technical Sciences

A. A. Chertkov,
Doctor of Technical Sciences

SHIP POWER PLANTS AND THEIR ELEMENTS (MAIN AND AUXILIARY)	128
<i>Afanaseva O. V.</i> Method for comprehensive assessment of the technical condition of marine diesel engines using multidimensional analysis.....	128
AUTOMATION AND CONTROL OF TECHNOLOGICAL PROCESSES AND PRODUCTIONS	139
<i>Tyndykar L. N.</i> An intelligent diagnostic system for shipboard equipment using the mode decomposition and machine learning methods.....	139
<i>Iskanderov Y. M., Butsanets A. A., Sharkova. V. P.</i> Intelligent support for monitoring transport and logistics services in integrated supply chains based on risk management.....	152

ЭКСПЛУАТАЦИЯ ВОДНОГО ТРАНСПОРТА, ВОДНЫЕ ПУТИ СООБЩЕНИЯ И ГИДРОГРАФИЯ

DOI: 10.21821/2309-5180-2026-18-1-7-17

EDN IRLDCM

ASSESSMENT OF THE IMPACT OF QUARRYING ON NAVIGABLE CONDITIONS IN DOWNSTREAM OF THE CHEBOKSARY HYDROELECTRIC COMPLEX

P. V. Belyakov, P. S. Rzhakovskaya, S. V. Konopatsky

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

This study addresses the operation of unsupported hydroelectric facilities, including the Cheboksary hydroelectric complex, which can cause significant changes in the hydrological and channel regimes of the downstream sections, leading to progressive channel erosion and reductions in water levels. A comprehensive assessment is presented of the impact of non-metallic building material extraction on the channel morphology and navigable conditions of the Volga River between km 1187.0 and 1255.0 downstream of the Cheboksary hydroelectric complex. The methodology is based on two-dimensional mathematical modeling of sediment transport and flow characteristics using the Saint-Venant equation system in the FLOOD software package. Modeling was performed for two states of the channel: the actual (existing) and the design state (considering full quarry development). Results indicate that quarry development has a limited effect on the level regime. The Sidelnikovskoye field exerts the greatest influence on flow hydraulics, where current velocities along the navigable channel are reduced by half, and local bottom deformations are observed in some areas. Development of other fields causes reduced current velocities without inducing washouts, as the velocities in these areas remain below the calculated non-washout threshold. The analysis suggests that under current conditions, channel quarrying for the extraction of non-metallic building materials will not produce adverse effects, will not further reduce water levels, will not exacerbate channel erosion, and will not deteriorate navigable conditions in this section of the Volga River.

Keywords: channel deformation, flow velocity, water discharge, sediment transport, sediment flow rate, mathematical modeling, quarrying, downstream, navigable conditions, hydroelectric complex.

For citation:

Belyakov, Pakhom V., P. S. Rzhakovskaya and S. V. Konopatsky. "Assessment of the impact of quarrying on navigable conditions in downstream of the Cheboksary hydroelectric complex." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 18.1 (2026): 7–17. DOI: 10.21821/2309-5180-2026-18-1-7-17.

УДК: 556.536

ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ РАЗРАБОТКИ КАРЬЕРОВ НА СУДОХОДНЫЕ УСЛОВИЯ В НИЖНЕМ БЬЕФЕ ЧЕБОКСАРСКОГО ГИДРОУЗЛА

П. В. Беляков, П. С. Ржаковская, С. В. Конопацкий

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

Темой исследования является вопрос эксплуатации бесподпорных гидроузлов, к которым относится Чебоксарский гидроузел, так как возможные изменения некоторых режимов его работы приводят к значительным изменениям гидрологического и руслового режимов в нижних бьефах, вызывая прогрессирующую эрозию русла и понижение уровней воды. В статье выполнена комплексная оценка влияния добычи нерудных строительных материалов на русловые и судоходные условия участка реки Волги

в нижнем бьефе Чебоксарского гидроузла (на участке 1187,0–1255,0 км судового хода). Методология работы основана на двумерном математическом моделировании характеристик течения и транспорта наносов с применением системы уравнений Сен-Венана в программном комплексе FLOOD. Моделирование проведено для двух состояний русла: бытового (фактического) и проектного (с учетом полной отработки карьеров). Результаты расчетов показали, что разработка карьеров не окажет значительного влияния на уровенный режим. Наибольшее воздействие на гидравлику потока оказывает месторождение «Сидельниковское», где скорости течения на судовом ходу снижаются вдвое, а на отдельных участках наблюдаются локальные деформации дна. При этом разработка других месторождений приводит к снижению скоростей течения, не вызывая размывов, так как скорость на этих участках не превышает расчетных значений неразмывающей скорости. Проведенный анализ позволяет сделать вывод, что в существующих условиях разработка русловых карьеров с целью добычи нерудных строительных материалов не вызовет негативных последствий: не приведет к дополнительному понижению уровней воды, не усилит эрозионные процессы в русле и не приведет к ухудшению условий судоходства на данном участке реки Волги.

Ключевые слова: русловые переформирования, скорость течения воды, расход воды, транспорт наносов, расход наносов, математическое моделирование, разработка карьера, нижний бьеф, судоходные условия, гидроузел.

Для цитирования:

Беляков П. В. Оценка влияния разработки карьеров на судоходные условия в нижнем бьефе чебоксарского гидроузла / П. В. Беляков, П. С. Ржаковская, С. В. Конопацкий // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2026. — Т. 18. — № 1. — С. 7–17. DOI: 10.21821/2309-5180-2026-18-1-7-17. — EDN IRLDCM.

Введение (Introduction)

Эксплуатация бесподпорных гидроузлов приводит к значительным изменениям гидрологического и руслового режимов в нижних бьефах. Основной проблемой является развитие эрозии русла, которая прогрессирует с момента ввода объекта в эксплуатацию [1]. Это вызывает необратимое понижение уровней воды и, как следствие, ухудшение условий судоходства. Ключевым фактором, усиливающим эрозию, является режим работы ГЭС, особенно в периоды межени, когда суточное и недельное регулирование стока создает неустановившийся режим течения. Наличие данного фактора нарушает стабильную зависимость между расходами и уровнями воды. Пиковые попусковые расходы увеличивают скорости течения, что активизирует перемещение наносов. В результате усиливается заносимость дноуглубительных прорезей и снижается устойчивость судового хода, а также добыча строительных материалов в нижних бьефах, которая дополнительно нарушает естественный баланс русла и интенсифицирует процессы размыва [2].

Чебоксарский гидроузел как завершающая ступень Волжского гидроэнергетического каскада проектировался и строился с целью создания в европейской части России единого глубоководного пути с гарантированной глубиной судового хода, равной 4 м. Однако Чебоксарское водохранилище осуществляет лишь суточное регулирование стока в целях энергетики. Повышение уровня водохранилища выше отметки 63,0–63,3 м БС происходит в основном во время половодья.

Целью настоящей работы является оценка влияния разработки карьеров нерудных строительных материалов на уровенный и русловый режимы, а также судоходные условия участка реки Волги 1185,0–1250,0 км по судовому ходу. Задачей является выполнение расчетного обоснования в процессе моделирования гидравлических характеристик потока [3] при расчетных уровнях (на верхней границе расчетной области $Z_{\text{верхн}} = 50,00$ м БС; на нижней границе расчетной области $Z_{\text{нижн}} = 49,30$ м БС) и расходе воды $Q = 2000$ м³/с.

При проектном уровне воды гидравлические расчеты выполнялись на основании данных, характеризующих рельеф русла и поймы по материалам батиметрических съемок и лоцманских карт (рис. 1).

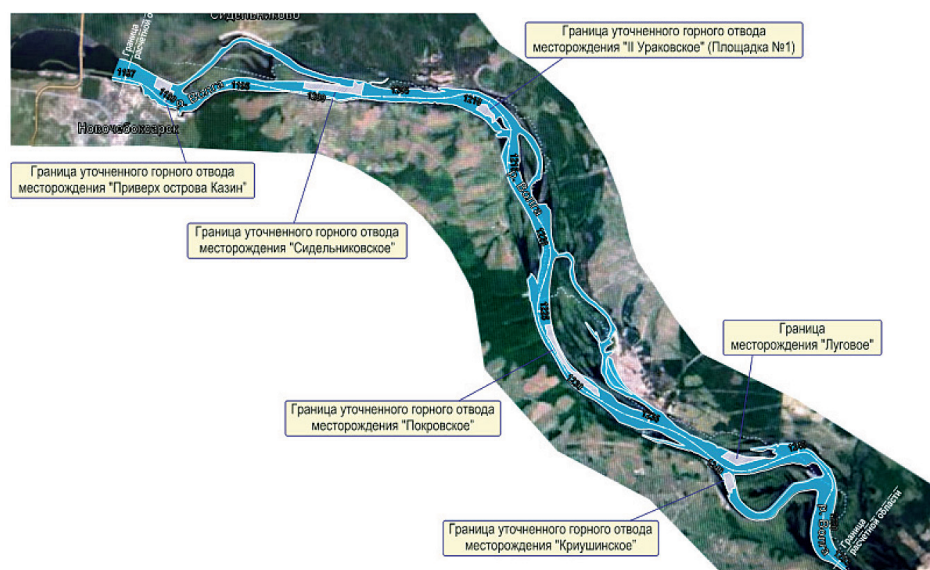


Рис. 1. Схема участка реки Волги в нижнем бьефе Чебоксарского гидроузла с границами моделируемой области

В работе исследовано влияние месторождений нерудных строительных материалов «Приверх острова Казин», «Сидельниковское», «Покровское», «Луговое» и «Криушинское», планируемых к разработке на уровенный и русловой режимы в нижнем бьефе Чебоксарского гидроузла.

Методы и материалы (Methods and Materials)

По результатам предварительной оценки на участке реки Волги были получены расчетные значения расходов и уровней воды, характеризующие гидрологический и русловой режимы, поскольку, согласно имеющимся данным, наибольшие изменения гидравлических характеристик (уровней воды и скоростей течения) наблюдаются в меженные периоды в результате дноуглубительных и добычных работ.

Гидравлические расчеты для сравнительной оценки режима реки были выполнены для двух состояний: бытового (естественного) и проектного (с учетом полной отработки намеченных русловых карьеров)¹. Для оценки влияния разработки карьеров на уровенный режим и русловые деформации было проведено математическое моделирование характеристик течения и транспорта наносов в двумерной постановке с применением системы уравнений Сен-Венана в программном комплексе FLOOD, апробированном на практике при проектировании инженерных воднотранспортных мероприятий [4], [5]. Указанная система включает уравнение неустановившегося движения воды в реке, а также уравнения неразрывности и деформаций. Система уравнений замыкается эмпирическими зависимостями для коэффициента Шези и расхода наносов при соответствующих начальных и граничных условиях, характеризующих гидравлико-морфометрические и гидрологические особенности участка.

На рис. 2 приведены результаты расчета отметок свободной поверхности по длине исследуемого участка для бытового и проектного состояний русла. Результаты гидравлических расчетов в бытовом состоянии русла показывают, что при проектном уровне воды на верхнем участке Куйбышевского водохранилища, находящемся в зоне переменного подпора, наблюдаются малые уклоны свободной поверхности. При этом на верхнем участке расчетной области от створа гидроузла до н. п. Ураково, средний уклон свободной поверхности составляет величину около 1,36 см/км. На нижерасположенном участке реки средний уклон равен 0,76 см/км, т. е. почти в два раза меньше, чем на приплотинном участке в нижнем бьефе гидроузла.

¹ Добыча нерудных строительных материалов в водных объектах. Учет руслового процесса и рекомендации по проектированию и эксплуатации русловых карьеров. СТО ФГБУ «ГГИ» 52.08–2012.

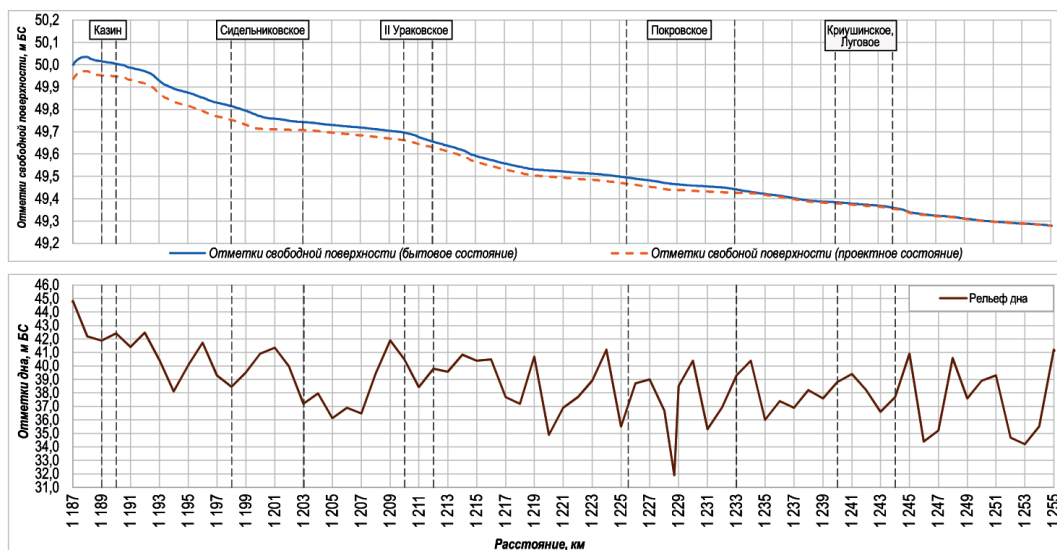


Рис. 2. Продольные профили отметок свободной поверхности и отметок дна по оси судового хода

Проведенные расчеты отметок свободной поверхности воды (см. рис. 2) показали, что при существующих естественных уклонах русла разработка намеченных по длине реки карьеров окажет незначительное воздействие на положение уровней воды. Основным последствием является формирование локальных понижений уровня в районе верхнего уступа карьера. На участке реки, расположенном выше карьера, формируется кривая спада уровней воды и происходит частичная компенсация снижения уровней воды. По длине реки, снизу вверх против течения воды, происходит суммирование локальных понижений отметок уровней воды в карьерах.

На верхней границе расчетной области в районе оголовка дамбы нижнего подходного канала к Чебоксарским шлюзам суммарное понижение уровня воды при разработке всех карьеров остается несущественным и составляет около 6,2 см. Исследования² подтверждают, что компенсация (восстановление) понижений уровней на межкарьерных участках выражена слабо. Согласно имеющимся данным, степень восстановления уровня воды находится в прямой зависимости от величины уклона водной поверхности и длины участка, и в обратной зависимости от глубины потока. В случае одновременной разработки карьеров в отведенных границах месторождений на данном участке реки Волги в нижнем бьефе Чебоксарского гидроузла максимальная величина снижения уровней воды в районе подходного канала к шлюзам останется в пределах точности измерения глубин на судовом ходу.

Как показали результаты выполненных гидравлических расчетов по оценке влияния карьеров нерудных строительных материалов на уреченный режим реки, наибольшее снижение уровней воды произойдет в результате разработки месторождения «Сидельниковское». Данное месторождение имеет относительно большую длину и расположено на участке реки выше н. п. Ураково, где уклоны свободной поверхности больше, чем на нижерасположенном участке. Влияние трех нижерасположенных месторождений на уреченный режим реки оказалось незначительным. В реальных условиях при разработке двух верхних месторождений – «Приверх острова Казин» и «Сидельниковское» – наряду с увеличением емкости русла в границах разрабатываемых месторождений на положение уровней воды будут оказывать влияние сезонные и многолетние переформирования, происходящие в русле реки.

Интенсивность и направленность русловых переформирований определяются величиной скорости течения воды и знаком конвективного ускорения ($\partial V / \partial L$)-производной от изменения

² Руководство по улучшению судоходных условий на свободных реках. СПб.; ЛИВТ, 1992. 312 с.

скорости по длине потока. При этом, если скорость течения воды оказывается больше неразмывающей скорости течения и возрастает по длине реки, т. е. $\partial V / \partial L > 0$, то на данном участке следует ожидать размыв русла и, наоборот, при отрицательных конвективных ускорениях на участке, когда скорость уменьшается по длине, происходит отложение наносов.

На рис. 3 представлены совмещенные продольные профили средних скоростей течения на судовом ходу, соответствующие бытовому и проектному состояниям русла, а также профиль неразмывающей скорости течения, рассчитанный по методике В. Н. Гончарова.

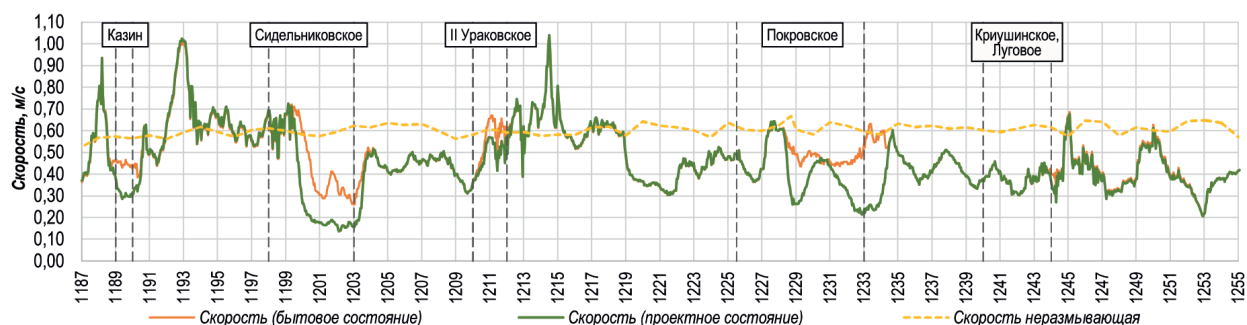


Рис. 3. Продольные профили средних скоростей течения воды по оси судового хода

Результаты выполненных расчетов позволяют оценить гидравлические характеристики потока и свидетельствуют о том, что при проектном уровне воды средние скорости течения на судовом ходу в пределах моделируемого участка варьируются в диапазоне 0,4–0,5 м/с. В верхней части исследуемого участка на некоторых отрезках русла скорость потока незначительно превышает неразмывающую скорость, что указывает на ограниченные деформации в русле. На участке ниже н. п. Ураково до нижней границы расчетной области скорость течения на судовом ходу не превышает неразмывающую скорость. Разработка месторождений нерудных строительных материалов окажет влияние на гидравлические характеристики потока, приведя к снижению скоростей течения на судовом ходу в зоне влияния разрабатываемых карьеров. Результаты расчетов скоростей течения воды для бытового и проектного состояний русла представлены на совмещенных поперечных сечениях для каждого из разрабатываемых карьеров на рис. 4.

На рис. 4, а показано поперечное сечение русла в районе месторождения «Приверх острова Казин». Полученные результаты показывают, что разработка карьера, занимающего часть ширины русла реки, приведет к уменьшению скорости течения на всем участке в районе расположения руслового карьера. В пределах судового хода наблюдается снижение скорости течения приблизительно на 40 % относительно бытовых условий русла.

На рис. 4, б показано поперечное сечение русла в районе месторождения «Сидельниковское». Месторождение «Сидельниковское» расположено в основном рукаве на участке разветвления русла реки, в нижней части Воложки Новинская. В связи с малой пропускной способностью несудоходной Сидельниковской воложки в межень разработка данного месторождения скажется на гидравлических характеристиках потока преимущественно в основном русле реки. Руслевой карьер перераспределяет расход воды в свою пользу. На судовом ходу после его разработки скорость течения воды снизится в два раза.

На рис. 4, в показано поперечное сечение русла в районе месторождения «II Ураковское», расположенного на правобережном побочне у выпуклого берега в основном рукаве в районе переката Демешкинский. Гидравлическая картина речного потока на данном участке является благоприятной для судоходства. Влияние карьера практически локализуется в границах месторождения и не скажется на скоростном режиме на судовом ходу. Разрабатываемый карьер будет способствовать аккумуляции наносов со стороны судового хода в направлении выпуклого берега и снижению интенсивности роста правобережного побочня [6].

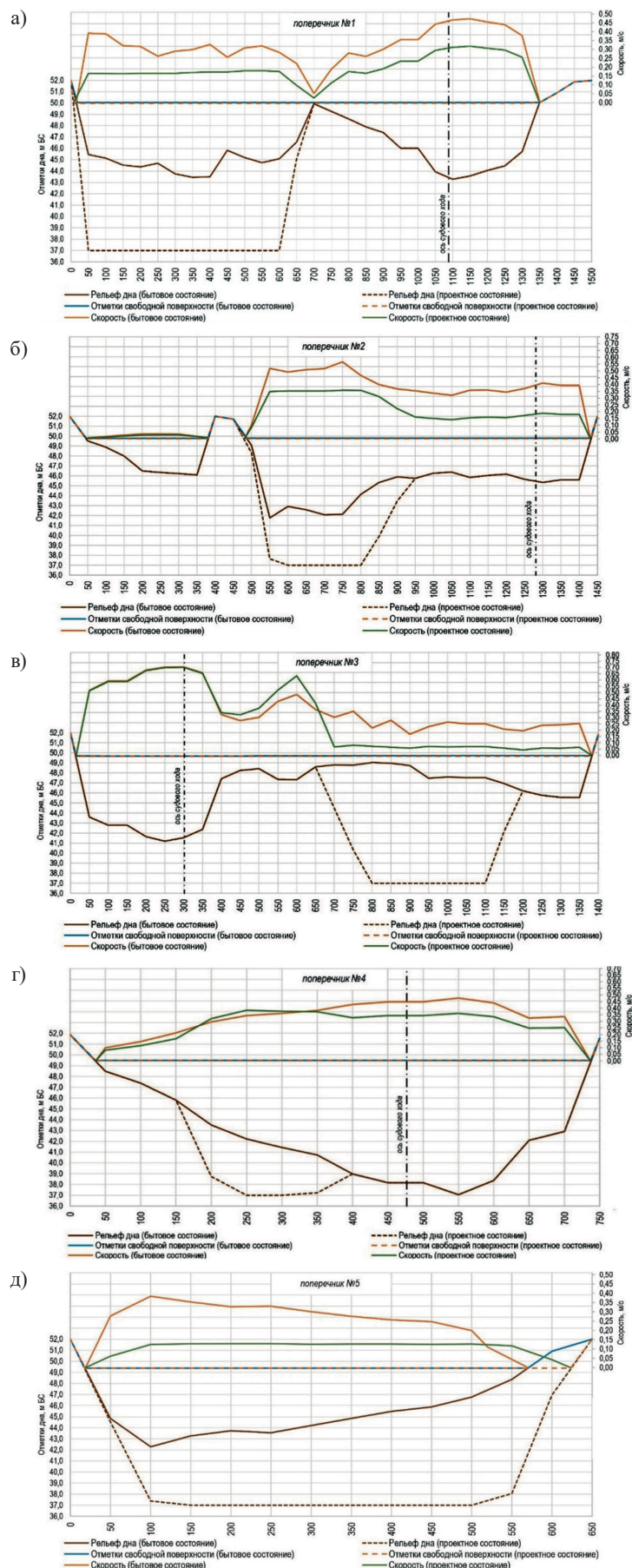


Рис. 4. Поперечное сечение русла на участках месторождений: а — «Приверх острова Казин»; б — «Сидельниковское»; в — «П Ураковское»; г — «Покровское»; д — «Криушинское»

На рис. 4, *г* показано поперечное сечение русла в районе месторождения «Покровское». Это месторождение расположено узкой полосой вдоль левого берега в районе переката Кушниковский. На рассматриваемом участке речной поток протекает вдоль правого прижимного вогнутого берега, где к настоящему времени сформировались судоходные глубины до 15,0–17,1 м при нормальном подпорном уровне воды. В бытовом состоянии в межень средняя скорость течения воды на судовом ходу составляет приблизительно 0,45 м/с. Разработка карьера приведет к некоторому перераспределению расхода воды, что впоследствии вызовет снижение скорости течения на судовом ходу примерно до 0,35 м/с.

На рис. 4, *д* показано поперечное сечение русла в районе месторождения «Криушинское». Месторождение расположено в истоке Криушинской воложки. Данный участок при условии обеспечения в навигационный период отметки 49,0 м БС в верхнем бьефе Самарского гидроузла находится в зоне постоянного подпора от Куйбышевского водохранилища [7]. Скорости течения на судовом ходу в зоне влияния карьера (см. рис. 3) составляют 0,3–0,4 м/с, не превышая значений неразмывающих скоростей. В этих условиях деформаций дна не происходит. Разработка месторождения не приведет к изменению гидравлических характеристик потока на участке разветвления и не повлияет на судоходные условия. Анализ скоростного режима потока по длине судового хода на рассматриваемом на рис. 3 участке реки показал, что при проектном уровне воды деформации дна возможны только в границах месторождения «Сидельниковское». В зоне влияния всех остальных карьеров скорости течения оказались меньше неразмывающих величин, и деформаций дна в ходе выполнения гидравлических расчетов не выявлено.

На рис. 5 показаны фрагменты результатов математического моделирования гидравлических характеристик потока в пределах месторождения «Сидельниковское» для бытового и проектного состояний.

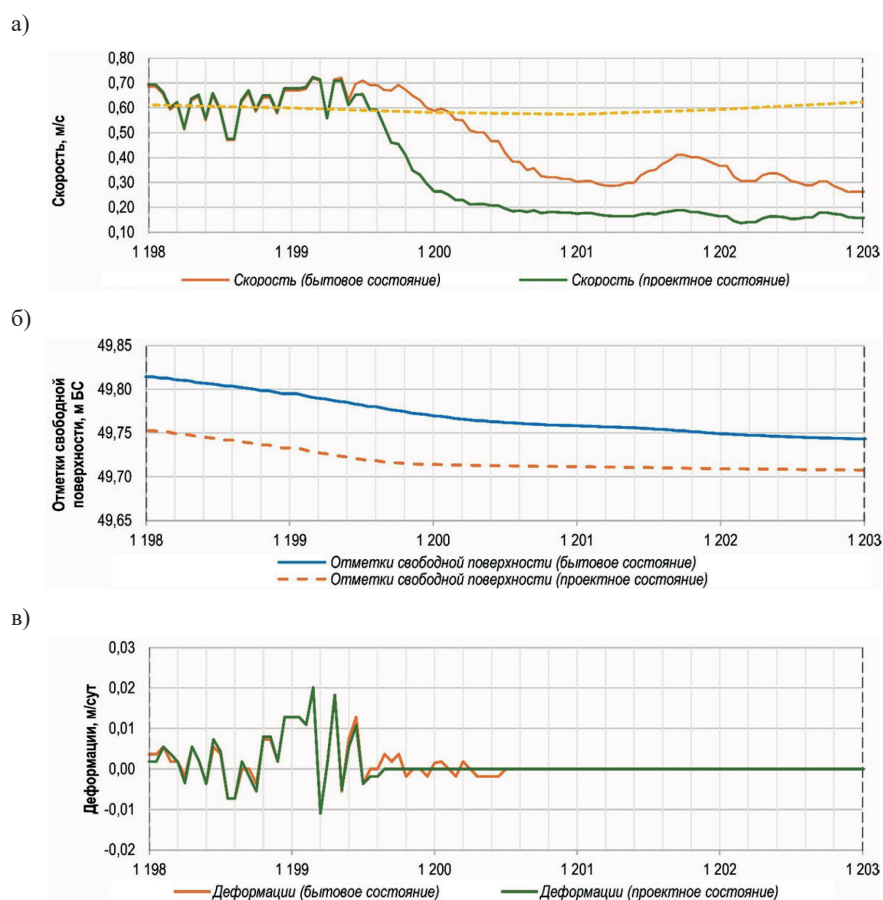


Рис. 5. Совмещенные профили: *а* — средней на вертикали скорости течения на судовом ходу, неразмывающей скорости течения; *б* — профилей свободной поверхности; *в* — скорости начальной деформации дна

Таким образом, результаты проведенных исследований показали, что в верхней части судового хода в пределах месторождения средние на вертикали скорости течения воды на некоторых участках незначительно превышают неразмывающую скорость. Превышение составляет порядка 0,1 м/с. В то же время в нижней части карьера скорости течения оказались меньше значений неразмывающей скорости. По результатам выполненных расчетов в верхней части участка наблюдаются знакопеременные деформации дна с максимальной интенсивностью до 2 см/сут. В проектном состоянии после полной отработки карьера протяженность участка русла, подверженного деформациям, сократилась на 400 м, а интенсивность деформаций снизилась.

Результаты (Results)

Проведенные исследования заносимости русловых карьеров на реках показали, что заполнение отработанных емкостей больших карьеров речным аллювием происходит за счет двух основных факторов: в результате перемещения верхового уступа карьера и поступления наносов со стороны боковых кромок выемки. В соответствии с этим нижняя часть руслового карьера, разрабатываемого на месторождении «Сидельниковское», будет заполняться наносами со стороны правого откоса выемки в результате отвлечения аллювия со стороны судового хода в основном русле реки, а также со стороны левой кромки карьера за счет наносов, поступающих из Сидельниковской воложки. С течением времени, по мере заполнения карьера наносами, глубины на участке реки вблизи карьера будут постепенно выравниваться, т. е. произойдет дальнейшее понижение отметок дна на судовом ходу, в том числе в границах Морпосадского переката. Границы горного отвода месторождения «II Ураковское» определены на правобережном побочне в вершине излучины реки Волги в интервале значений 1210–1212 км судового хода.

В соответствии с основными положениями гидроморфологической теории руслового процесса [8] специфика развития руслового процесса на таких участках заключается в том, что в районе выпуклого берега речной излучины происходит отложение наносов. В свою очередь, противоположный вогнутый берег реки размывается потоком, что приводит к прогрессирующему искривлению судового хода, расположенного у прижимного берега. Об этом, в частности, свидетельствует сопоставление материалов Лоцманских карт за 2006 и 2022 гг., откуда следует, что на участке 1208,7–1210,0 км, расположенном выше границы месторождения, происходит рост в размерах правобережного побочня и его перемещение в направлении судового хода со стороны правой кромки. Для обеспечения безопасности судоходства на данном участке при подходе к нему сверху по течению реки установлен буй на правой кромке судового хода.

Выполненные в настоящей работе расчеты гидравлических характеристик потока реки Волги в районе данного месторождения (рис. 6) показали, что в результате разработки руслового карьера скорость течения воды в его границах существенно снизится. Донные струи речного потока в районе перемычки, расположенной между основным руслом и русловым карьером, направлены в сторону отработанного карьера (проектное состояние с учетом полной отработки карьеров на месторождениях 1187–2053 км по судовому ходу), что будет способствовать отложению наносов в использованные емкости за пределами судового хода. В настоящее время на участке судового хода 1210–1212 км реки Волги минимальная глубина составляет 7,2 м.

Расположенные в нижнем бьефе Чебоксарского гидроузла «Сидельниковское», «II Ураковское» и «Покровское» месторождения расположены на однорукавных участках русла реки Волги в непосредственной близости от основного судового хода. Режим русловых переформирований в зоне влияния этих карьеров будет заключаться в том, что по мере их отработки и последующей заносимости речными наносами будет происходить постепенное выравнивание глубин в русле реки с общим трендом на понижение отметок дна, в том числе в границах судового хода. С течением времени, после полной отработки карьеров, судовые ходы приобретут более прямолинейные очертания, уменьшится их кривизна и появится возможность снять имеющиеся ограничения на обгон и расхождение судов и составов.

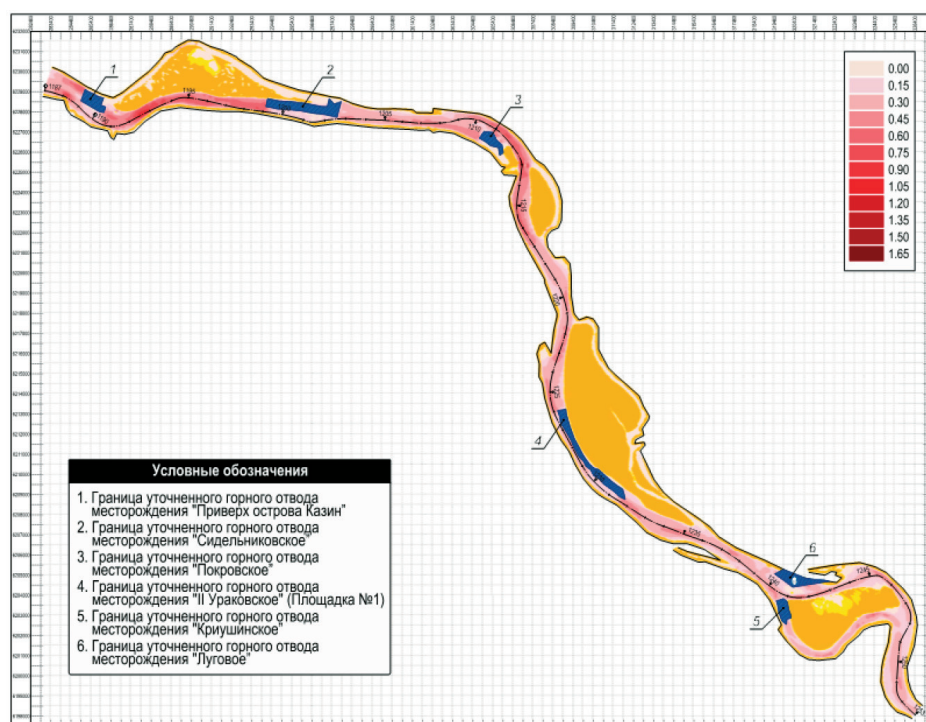


Рис. 6. Поле средних скоростей течения воды
по данным компьютерной обработки, м/с (проектное состояние)

Аналогичную картину влияния разработки карьеров на гидравлические характеристики речного потока, переформирования русла реки и условия содержания судовых ходов следует ожидать при отработке других месторождений, рассмотренных в настоящей работе. В соответствии с требованиями действующего законодательства недропользователю рекомендуется осуществлять локальный мониторинг дна и берегов водного объекта на участках разработки карьеров.

Выводы (Summary)

На основе проведенного исследования можно сделать следующие выводы:

1. С момента ввода Чебоксарского гидроузла в эксплуатацию в нижнем бьефе активизировались эрозионные процессы, что привело к однонаправленному понижению отметок дна на судовом ходу. До 2006 г. средняя глубина на судовом ходу ежегодно увеличивалась на 4,4 см. За последний анализируемый отрезок времени (с 2006 по 2022 гг.) на участке наблюдались незначительные знакопеременные деформации. На верхнем 30-километровом отрезке водного пути, расположенном от створа Чебоксарского гидроузла до н. п. Ураково, наблюдалась тенденция понижения отметок дна на судовом ходу со средней интенсивностью около 1,1 см в год.

2. Результаты математического моделирования скоростей течения воды и деформаций русла реки на рассматриваемом участке реки Волги показали, что при проектном уровне воды в нижнем бьефе гидроузла в границах расчетной области на участке наблюдаются минимальные значения скоростей течения воды и незначительные уклоны свободной поверхности [9].

3. Влияние разработки русловых карьеров на данном участке в этих условиях не приведет к дополнительному снижению уровня воды, интенсификации эрозионных процессов и необходимости корректировки планового положения судового хода в нижнем бьефе Чебоксарского гидроузла [10].

4. Эксплуатация месторождений нерудных строительных материалов в нижнем бьефе Чебоксарского гидроузла при соблюдении стандартной технологической схемы разработки и запланированных объемов добычи из месторождений не внесет значимых изменений в естественный водный и русловой режимы [11].

5. Освоение запланированных к разработке карьеров не приведет к ухудшению условий судоходства на данном участке реки Волги. В зоне влияния карьеров не потребуется проведения дополнительных русловыправительных и дноуглубительных работ при содержании транзитных судовых ходов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гладков Г. Л. Гидроморфология русел судоходных рек / Г. Л. Гладков, Р. С. Чалов, К. М. Беркович. — Санкт-Петербург: Лань, 2023. — 432 с. — EDN WIKSCS.
2. Агеев С. Н. Улучшение судоходных условий на участках расположения русловых карьеров нерудных строительных материалов: автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук; специальность: 05.22.17 «Водные пути сообщения и гидрография» / С. Н. Агеев. — Новосибирск: НГАСУ, 1998. — 102 с. — EDN NFMCBV.
3. Соболев С. В. Взгляд в завтра: транспортный гидроузел на Р. Волге / С. В. Соболев, А. В. Февралев // Приволжский научный журнал. — 2020. — № 4(56). — С. 174–180. — EDN VJOZUQ.
4. Беликов В. В. Модели мелкой воды в задачах речной гидродинамики / В. В. Беликов, А. И. Алексюк. — Москва: Российская Академия наук, 2020. — 346 с. — EDN UYFXSP.
5. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2002610941 Российская Федерация. Комплекс программ для расчета речных течений (FLOOD) / Беляков П. В., Милитеев А. Н. — № 2002610689; заявл. 25.04.2002; опубл. 13.06.2002.
6. Гладков Г. Л. Гидравлические характеристики речного потока и условия транспорта наносов в нижнем бьефе гидроузла / Г. Л. Гладков, П. С. Ржаковская // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2023. — Т. 15. — № 3. — С. 344–358. DOI: 10.21821/2309-5180-2023-15-3-344-358. — EDN KNHYGH.
7. Ильина А. А. Гидрологические и экологические проблемы Чебоксарского и Куйбышевского водохранилищ Чебоксарского участка Чувашской Республики / А. А. Ильина, И. В. Никонорова, В. Н. Ильин, Е. А. Никитина // Успехи современного естествознания. — 2023. — № 6. — С. 34–39. DOI: 10.17513/use.38050. — EDN JFIWHY.
8. Кондратьев Н. Е. Основы гидроморфологической теории руслового процесса / Н. Е. Кондратьев, И. В. Попов, Б. Ф. Смищенко. — Л: Гидрометеиздат, 1982. — 272 с.
9. Агеева В. В. Численное моделирование участка реки в трехмерной постановке задачи для корректировки параметров проектируемых русловых карьеров / В. В. Агеева, Е. А. Люкина, Д. А. Мильцын, А. А. Ханова // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Морская техника и технология. — 2023. — № 1. — С. 72–79. DOI: 10.24143/2073-1574-2023-1-72-79. — EDN SZNJPG.
10. Беркович К. М. Разработка русловых карьеров в подвижных руслах рек: реакция, последствия и перспективы / К. М. Беркович, Л. В. Злотина, Л. А. Турыкин // Известия Русского географического общества. — 2023. — Т. 155. — № 1. — С. 13–20. DOI: 10.31857/S0869607123010032. — EDN HCVANJ.
11. Чалов Р. С. Гидролого-географические аспекты управления русловыми процессами / Р. С. Чалов // Вестник Московского университета. Серия 5: География. — 2019. — № 6. — С. 11–19. — EDN VBVDXX.

REFERENCES

1. Gladkov, G. L., and R. S. Chalov, K. M. Berkovich. *Hydromorphology of navigable river beds*. — 4th ed., Erased — St. Petersburg: Doe, 2023.
2. Ageev, S. N. *Uluchshenie sudokhodnykh usloviy na uchastkakh raspolozheniya ruslovykh kar'ero'v nerudnykh stroitel'nykh materialov*. PhD diss. Novosibirsk, 1998.
3. Sobol', S. V. and A. V. Fevrale'v. "A look into tomorrow: a transport hub on the Volga river." *Privolzhsky Scientific Journal* 4(56) (2020): 174–180.
4. Belikov, V. V. and A. I. Alekseyuk. *Modeli melkoy vody v zadachakh rechnoy gidrodinamiki*. Moskva: Rossiyskaya akademiya nauk, 2020: 346.
5. Belikov, V. V. and Militeev A. N. RU 2 002 610 941. *Kompleks programm dlya rascheta rechnykh techeniy (FLOOD)*. Russian Federation, assignee. Publ. June 13.

6. Gladkov, G. L. and P. S. Rzhakovskaya. "Hydraulic characteristics of the river flow and sediment transport conditions in the downstream pool of the hydroelectric complex." *Vestnik gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 15.3 (2023): 344–358. DOI: 10.21821/2309-5180-2023-15-3-344-358.

7. Il'ina, A. A., I. V. Nikonorova, V. N. Il'in and E. A. Nikitina. "Hydrological and ecological problems of cheboksary and kuibyshev reservoirs of cheboksary section of the chuvash republic." *Uspekhi sovremennogo estestvoznaniya* 6 (2023): 34–39. DOI: 10.17513/use.38050.

8. Kondrat'ev, N. E., I. V. Popov and B. F. Snischenko. *Osnovy gidromorfologicheskoy teorii ruslovogo protsesssa*. L: Gidrometeoizdat, 1982: 272.

9. Ageeva, V. V., E. A. Lyukina, D. A. Mil'tsyn and A. A. Khanova. "Numerical modeling river section in 3-d problem formulation for adjusting parameters of projected channel quarries." *Vestnik of Astrakhan State Technical University. Series: Marine Engineering and Technologies* 1 (2023): 72–79. DOI: 10.24143/2073-1574-2023-1-72-79.

10. Berkovich, K. M., L. V. Zlotina and L. A. Turykin. "In-stream mining in alluvial river channels: response, consequences and perspectives." *Bulletin of The Russian Geographical Society* 155.1 (2023): 13–20. DOI: 10.31857/S0869607123010032.

11. Chalov, R. S. "Hydrological and geographical aspects of channel processes management." *Lomonosov Geography Journal* 6 (2019): 11–19.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Беляков Пахом Витальевич —

кандидат технических наук

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

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

e-mail: belyakovpv@gumrf.ru

Ржаковская Полина Сергеевна —

аспирант, старший преподаватель

Научный руководитель: Гладков Геннадий
Леонидович

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

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

e-mail: przhakovskaya@mail.ru

Конопацкий Сергей Васильевич —

старший преподаватель

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

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

e-mail: konopackijsv@gumrf.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Belyakov, Pakhom V. —

PhD in Technical Sciences

Admiral Makarov State University of Maritime
and Inland Shipping

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

e-mail: belyakovpv@gumrf.ru

Rzhakovskaya, Polina S. —

Postgraduate, senior lecturer

Supervisor: Gladkov, Gennadii L
Admiral Makarov State University of Maritime
and Inland Shipping

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

e-mail: przhakovskaya@mail.ru

Konopatsky, Sergey V. —

Senior lecturer

Admiral Makarov State University of Maritime
and Inland Shipping

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

e-mail: konopackijsv@gumrf.ru

Статья поступила в редакцию: 01 декабря 2025 г.

Received: Dec. 1, 2025

PRELIMINARY PROCESSING OF THE TEST RESULTS OF THE SMALL BELT HYDRODYNAMIC ANCHOR

O. V. Roslyakova, V. N. Kofeev, A. S. Chrenovich

Siberian State University of Water Transport, Novosibirsk, Russian Federation

The paper presents the results of research conducted by the scientific team at the Siberian State University of Water Transport over several years, aimed at addressing one of the critical components of the search and rescue process in maritime transport incidents — enhancing the speed of detection of rescue vehicles (SS) from emergency vessels, which may carry crew members and passengers. The study investigates a small belt hydrodynamic anchor consisting of a metal frame covered with a metal mesh, to which narrow belt strips are sewn closely along the upper edge of the frame to establish its optimal design characteristics. The paper describes the construction of the anchor and illustrates its appearance. The primary goal of the tests was to obtain quantitative characteristics of the anchor during experimental trials on a bench setup capable of simulating the orbital circular motion of the anchor on waves of varying heights. Experiments were conducted in the university's experimental pool using a crank stand that mimicked the orbital movement of a rescue vehicle on a wave. During testing, the orbital cycle period varied from 4 to 8 seconds, the angle of attack of the hydrodynamic anchor from 15° to 30°, and the deflection angle of the anchor flap from 35° to 50°, while recording the tension of the suspension cable. The results indicate that the optimal performance of the belt hydrodynamic anchor is achieved at an angle of attack of 25°, a flap deflection angle of 50°, and an orbital cycle period exceeding 7 seconds. These parameters are recommended for the design of fixed installation values for belt hydrodynamic anchors on rescue vehicles to minimize wind-wave drift. The study provides essential design guidelines for improving the operational efficiency and safety of rescue operations at sea.

Keywords: hydrodynamic anchor, return trajectory, suspension cable tension, anchor angles of attack, orbital cycle period, design settings, rescue operations, maritime safety, experimental pool testing, bench installation.

For citation:

Roslyakova, Oksana V., V. N. Kofeev and A. S. Chrenovich. "Preliminary processing of the test results of the small belt hydrodynamic anchor." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 18.1 (2026): 18–25. DOI: 10.21821/2309-5180-2026-18-1-18-25.

УДК 656.61.08

ПРЕДВАРИТЕЛЬНАЯ ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ ИСПЫТАНИЙ МАЛОГО ЛЕНТОЧНОГО ГИДРОДИНАМИЧЕСКОГО ЯКОРЯ

О. В. Рослякова, В. Н. Кофеев, А. С. Черенович

ФГБОУ ВО «СГУВТ», Новосибирск, Россия

В работе рассмотрен процесс исследований, проводимых научным коллективом вуза на протяжении нескольких лет, начиная с 2019 г. по настоящее время, направленных на решение одной из важных составляющих процедуры поиска и спасения людей при транспортных происшествиях на море — оперативности обнаружения спасательных средств аварийного судна, на котором могут находиться члены экипажа и пассажиры. В работе выполнены исследования малого ленточного гидродинамического якоря, состоящего из металлической рамы, покрытой металлической сеткой, к которой вплотную друг к другу пришиты ленточные полоски вдоль верхней кромки рамы для установления его оптимальных конструктивных характеристик. Описана конструкция и показан внешний вид исследуемого гидродинамического якоря. Целью являлось получение количественных характеристик исследуемого якоря при испытаниях на стендовой установке, позволяющей имитировать орбитальное круговое движение якоря с различной высотой волны. Испытания проводились в опытовом бассейне на кривошипном стенде, имитирующем орбитальное движение спасательного средства на волнении. В ходе проведения испытаний варьировались следующие характеристики: период орбитального цикла 4–8 с, угол атаки гидродинамического якоря от 15° до 30°, угол отклонения закрылка гидродинамического якоря от 35° до 50°, а также фиксировалось натяжение троса подвески. При заданных параметрах наилучшие результаты работы ленточного гидродинамическо-

го якоря были достигнуты при угле атаки, равном 25° , угле отклонения закрылка 50° и периоде орбитального цикла более 7 с. Впоследствии эти параметры рекомендованы для проектирования фиксированных установочных значений ленточного гидродинамического якоря на спасательные средства для снижения ветро-волнового дрейфа.

Ключевые слова: гидродинамический якорь, возвратная траектория, натяжение троса подвески, углы атаки якоря, период орбитального цикла, задание проектировочных установок, обеспечение безопасности людей, транспортные средства, морские транспортные происшествия, длительность рейсов.

Для цитирования:

Рослякова О. В. Предварительная обработка результатов испытаний малого ленточного гидродинамического якоря / О. В. Рослякова, В. Н. Кофеев, А. С. Черенович // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2026. — Т. 18. — № 1. — С. 18–25. DOI: 10.21821/2309-5180-2026-18-1-18-25. — EDN JLHRXP.

Введение (Introduction)

Обеспечение безопасности людей является главной задачей в процессе эксплуатации любого транспортного средства, в частности морского судна, особенно пассажирского. Согласно официальным данным Ространснадзора, ежегодно фиксируются чрезвычайные ситуации с участием судов водного транспорта. В течение 2024–2025 гг. в мировой практике произошли существенные изменения маршрутов судов, следствием которых является увеличение расстояний маршрутов, что приводит к росту морских транспортных происшествий в результате увеличения длительности рейсов, интенсивности движения на морских путях, а также большого износа судов в результате старения в целом морского парка.

Причины несчастных случаев на море могут быть различными, но наиболее распространенными из них, согласно аналитическим данным, являются затопление (погружение на дно), крушение / посадка, столкновение (с участием судов), повреждение / выход из строя механизмов и повреждение корпуса судна [1, 2]. Ученые разных стран мира постоянно анализируют данные о несчастных случаях и происшествиях на море с помощью различных факторов риска и программных продуктов, обобщая различные критерии для оптимизации и обеспечения безопасного судоходства [3–5]. Так, авторы работы [6] предлагают решать вопросы безопасности с применением непрерывного мониторинга на судах на основе использования модели HFACS–CM, представляющей собой гибридный подход к анализу происшествий, который позволяет распределить человеческие ошибки с учетом фактических данных. Предложенная модель исследования применима к различным случаям морских происшествий для анализа роли человеческого фактора в развитии событий. Анализ морских происшествий за 50 лет, выполненный в работе [7], позволяет сделать вывод о том, что основной причиной аварий является *человеческий фактор*. Это подтверждается также источниками [8–10], свидетельствующими о высоком проценте ошибок персонала.

Для решения главной задачи — спасения людей с терпящего бедствие судна, помимо совершенствования технических систем, навигационного оборудования и судовой энергетической установки, необходимо уделять внимание также вопросу усовершенствования спасательных систем судов. Совершенствование средств спасения людей с терпящих бедствие морских судов остается актуальной задачей несмотря на развитие спасательно-координационной сети Мирового океана и обязательную для морских судов глобальную морскую систему связи при бедствии и для обеспечения безопасности (ГМССБ).

Известно, что площадь поиска спасательных средств (СС) аварийного судна пропорциональна квадрату скорости их ветро-волнового дрейфа. Поэтому основной изобретательно-исследовательской задачей для достижения поставленной цели является разработка средств снижения ветро-волнового дрейфа СС. В этом направлении в процессе проведения исследований было предложено несколько типов специальных гидродинамических якорей [11]–[13] и их компоновки в контейнере, а также в случае их совместного применения со стабилизаторами положения, отличающимися от применяемых в настоящее время плавучих якорей парашютного типа, относящихся к средствам пассивного сопротивления дрейфу.

Методы и материалы (Methods and Materials)

Гидродинамический якорь (ГДЯ) через натяжение троса, связывающего его с СС (плотом, шлюпкой), получающим от волнения энергию собственного орбитального движения, приводится в движение, в результате которого на нем возникают активные гидродинамические силы, направленные против сил дрейфа и одновременно препятствующие волновому опрокидыванию СС.

Одним из достаточно эффективных ГДЯ является ленточный гидродинамический якорь (ЛГДЯ) [10] (рис. 1). Он состоит из металлической рамы, покрытой металлической сеткой, к которой вплотную друг к другу пришиты ленточные полоски вдоль верхней кромки. На рабочем ходу, когда ЛГДЯ поднимается, прижатые потоком воды к стенке ленточки образуют плоское крыло. На холостом ходу, когда ЛГДЯ опускается, ленточки поднимаются, не оказывая заметного сопротивления погружению крыла. ЛГДЯ снабжен закрылком, выполняющим роль руля при подъеме крыла и роль предкрылка-формирователя возвратной траектории ЛГДЯ на холостом ходу.



Рис. 1. Ленточный гидродинамический якорь в опытовом бассейне

Для получения количественных гидродинамических характеристик ЛГДЯ проведено его испытание на специально сконструированном экспериментальном стенде, имитирующем орбитальное круговое движение СС на волне высотой h . Возвратная траектория ЛГДЯ при смене рабочего хода на холостой и снова на рабочий, выявленная в ходе экспериментов, приведена на рис. 2.

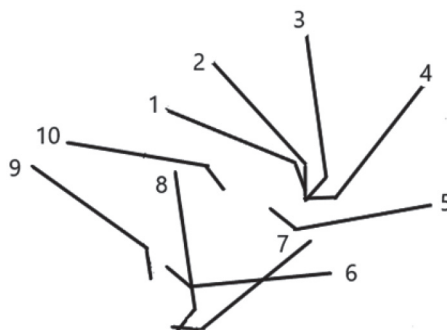


Рис. 2. Траектория ЛГДЯ из десяти последовательных позиций в конце рабочего хода 1, на холостом ходу 2–6 и в начале следующего рабочего хода 7–10

В ходе эксперимента варьировались время цикла орбитального движения τ , угол атаки крыла α относительно нормали к тросу подвески и угол установки закрылка β относительно

плоскости крыла. При установленных указанных параметров моделировалось орбитальное круговое движение верхней точки подвеса троса ЛГДЯ, а устройство ЛГДЯ с системой подвеса находилось в воде бассейна. Длина троса подвески $l = 3185$ мм; радиус круговой траектории точки подвеса троса на кривошипе $r = 0,75$ м, что соответствует высоте волны $h = 2r$. В статическом положении ЛГДЯ погружен в воду на глубину около 0,5 м при положении кривошипа в верхней мертвой точке.

Результаты (Results)

В процессе движения выполнялась дискретная по времени t с интервалом $\approx 0,1$ с запись натяжения троса $f(t)$ на протяжении нескольких циклов (рис. 3).



Рис. 3. Пример записи натяжения троса в одном из опытов

При общей схожести результатов каждого цикла в них имеются также индивидуальные различия, поэтому для обработки выбирались несколько наиболее близких по форме циклов, результаты которых осреднялись (рис. 4).

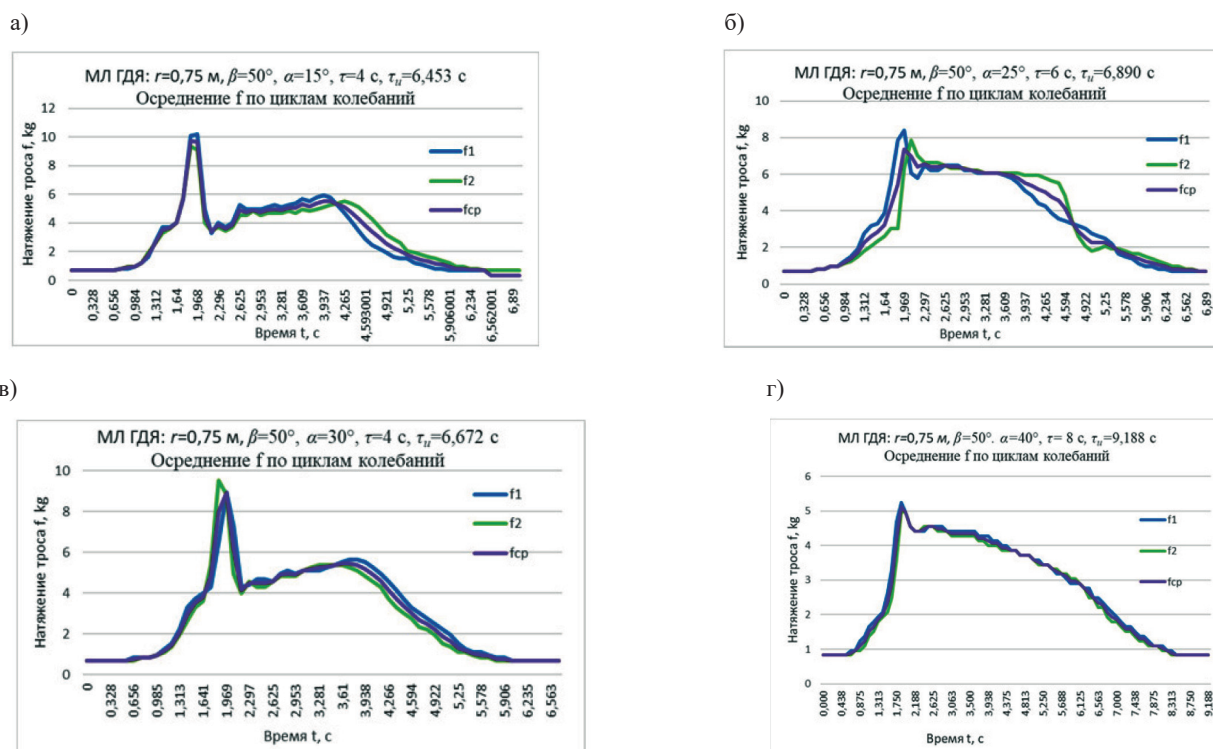


Рис. 4. Примеры осреднения результатов циклового натяжения троса ЛГДЯ:

a — $\alpha = 15^\circ$; заданный период $\tau = 4$ с; истинный период $\tau_n = 6,453$ с; b — $\alpha = 25^\circ$; заданный период $\tau = 6$ с; истинный период $\tau_n = 6,890$ с; v — $\alpha = 30^\circ$; заданный период $\tau = 4$ с; истинный период $\tau_n = 6,672$ с; $г$ — $\alpha = 40^\circ$; заданный период $\tau = 8$ с; истинный период $\tau_n = 9,188$ с

В ходе испытаний варьировались три ключевых параметра: время цикла орбитального движения τ , угол атаки крыла α (относительно нормали к тросу подвески), угол установки закрылка β (относительно плоскости крыла), что позволило комплексно оценить влияние каждого фактора на гидродинамические характеристики ЛГДЯ.

Обсуждение (Discussion)

Выполненная обработка результатов экспериментов позволяет дать оценку эффективности ЛГДЯ при различных заданных значениях периода цикла. Необходимо отметить, что заданные периоды циклов τ двигатель постоянного тока экспериментальной установки под нагрузкой ЛГДЯ не выдерживал, вследствие чего по записям выявлялись истинные достигнутые значения периодов $\tau_{\text{н}}$.

Эффективность установочных параметров ЛГДЯ оценивается по вкладу плато нагрузки f (величина нагрузки и ее продолжительность действия без пикового скачка нагрузки), что отражено в табл. 1 для заданных значений $\tau = 4$ с, 6 с, 8 с соответственно. По полному действию гидродинамических сил ЛГДЯ, превышающих его собственный вес ($P = 2,4$ кгс) представлены в табл. 4–6 для заданных значений $\tau = 4$ с, 6 с и 8 с соответственно. Пиковый скачок нагрузки, хорошо заметный на всех графиках рис. 3 и 4, обусловлен завершением времени свободного провисания троса в конце холостого хода и началом вовлечения ЛГДЯ в рабочий ход, когда возникают наибольшие инерционные силы. Этот скачок наиболее заметен при малых заданных периодах τ (см. рис. 4 а, в) и менее заметен при больших периодах τ (см. рис. 4, б, г).

В табл. 1 и 2 жирным шрифтом выделены значения параметров при максимальной длительности действия для данного τ , курсивом — при максимальной длительности действия максимальной нагрузки троса.

Таблица 1

Оценка эффективности МЛГДЯ по плато f

Параметр		Угол атаки α°			
		15	25	30	40
При заданном $\tau = 4$ с					
$\beta = 50^\circ$	$\tau_{\text{н}}$	6,562	6,672	6,672	6,453
	f	4,8–5,0–4,0	4,3–5,5–4,0	4,1–5,4–4,0	4,6–5,2–4,0
	t	2,187–4,544	2,188–4,316	2,188–4,302	2,188–4,047
	Δt	2,357 / 35,92 %	2,128 с / 31,89 %	2,144 с / 31,68 %	1,859 с / 28,81 %
$\beta = 35^\circ$	$\tau_{\text{н}}$	–	6,672	–	–
	f	–	4,9–6,0–4,0	–	–
	t	–	2,625–4,585	–	–
	Δt	–	1,960 с / 29,38 %	–	–
При заданном $\tau = 6$ с					
$\beta = 50^\circ$	$\tau_{\text{н}}$	7,109	6,890	7,219	7,109
	f	6,5–4,0	6,4–4,0	6,3–4,0	6,1–6,2–4,0
	t	2,187–4,315 2,078–4,370	2,187–4,624	2,625–4,370	2,187–4,102
	Δt	2,128 с / 29,93 % 2,292 с / 32,24 %	2,437 с / 35,37 %	1,475 с / 24,17 %	1,915 с / 26,94 %
При заданном $\tau = 8$ с					
$\beta = 50^\circ$	$\tau_{\text{н}}$	9,953	9,078	9,078	9,188
	f	6,3–4,0	5,4–4,0	5,2–4,0	4,6–4,0
	t	2,884–5,469	2,625–5,031	2,297–4,922	2,078–4,210
	Δt	2,625 с / 26,37 %	2,406 с / 26,50 %	2,625 с / 28,92 %	2,132 с / 23,20 %

Таблица 2

**Оценка эффективности МЛГДЯ
по дополнительному гидродинамическому сопротивлению f**

Параметр		Угол атаки α°			
		15	25	30	40
При заданном $\tau = 4$ с					
$\beta = 50^\circ$	τ_n	6,562	6,672	6,672	6,453
	f	2,4–2,4	2,4–2,4	2,4–2,4	2,4–2,4
	t	1,258–4,982	1,333–4,810	1,375–4,810	1,375–4,480
	Δt	3,724 с / 56,75 %	3,477 с / 52,11 %	3,435 с / 51,48 %	3,025 с / 46,88 %
$\beta = 35^\circ$	τ_n	–	6,672	–	–
	f	–	2,4–2,4	–	–
	t	–	1,425–5,032	–	–
	Δt	–	3,607 с / 54,06 %	–	–
При заданном $\tau = 6$ с					
$\beta = 50^\circ$	τ_n	7,109	6,890	7,219	7,109
	f	2,4–2,4	2,4–2,4	2,4–2,4	2,4–2,4
	t	1,200–4,872	1,352–5,001	1,745–5,042	1,462–4,713
	Δt	3,672 с / 51,65 %	3,649 с / 52,96 %	3,297 с / 45,67 %	3,251 с / 45,73 %
При заданном $\tau = 8$ с					
$\beta = 50^\circ$	τ_n	9,953	9,078	9,078	9,188
	f	2,4–2,4	2,4–2,4	2,4–2,4	2,4–2,4
	t	1,800–6,732	1,491–6,781	1,710–6,559	1,535–6,513
	Δt	4,932 с / 49,55 %	5,29 с / 58,27 %	4,849 с / 53,41 %	4,978 с / 54,18 %

Эффективность установочных параметров ЛГДЯ напрямую зависит от выбора заданных значений периода цикла τ . Наибольшая эффективность достигается при увеличенных значениях τ , так как это снижает пиковые инерционные нагрузки, увеличивает продолжительность стабильного плато, обеспечивает надежную работу системы при превышении гидродинамических сил над собственным весом ЛГД.

Следует отметить, что созданный стенд достоверно имитирует орбитальное круговое движение СС на волне с реализацией смены рабочего хода на холостой и обратный переход, позволяет обеспечить погружение ЛГДЯ в воду в соответствии с реальным положением кривошипа в верхней мертвой точке.

Выводы (Summary)

В результате исследования были определены количественные характеристики исследуемого малого ленточного гидродинамического якоря при испытаниях на стендовой установке при имитировании орбитального кругового движения малого якоря на волне с различной высотой h . Наилучшие результаты работы ленточного гидродинамического якоря были установлены при следующих исследуемых параметрах:

- пиковая нагрузка кратковременна и ее вклад в сопротивление дрейфу невелик;
- при увеличении истинного периода цикла τ_n максимальная эффективность плато нагрузки f достигается при увеличении угла атаки α крыла от 15° до 30° ;
- максимальные значения плато нагрузки ($f = 6,5–4,0$) достигнуты при значении истинного периода цикла около 7 с, при этом же периоде цикла достигнута близкая к максимуму

длительность действия (35,37 %) нагрузки при угле атаки $\alpha = 25^\circ$, этот же угол атаки оказался наиболее эффективным по общему гидродинамическому сопротивлению ЛГДЯ;

– уменьшение угла отклонения закрылка от 50° до 35° к повышению эффективности ЛГДЯ не привело.

Таким образом, в процессе проектирования фиксированных установочных параметров ЛГДЯ для СС следует остановиться на угле атаки $\alpha = 25^\circ$, при котором будут получены хорошие результаты на достаточно длинных волнах более 70 м и углах атаки $\alpha = 15\text{--}25^\circ$ при меньших длинах волн.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Baalisampang T. Review and analysis of fire and explosion accidents in maritime transportation / T. Baalisampang, R. Abbassi, V. Garaniya, F. Khan, M. Dadashzadeh // *Ocean Engineering*. — 2018. — Vol. 158. — Pp. 350–366. DOI: 10.1016/j.oceaneng.2018.04.022.
2. Волкова Н. А. Комплексный подход к снижению аварийности на внутренних водных путях арктического региона России / Н. А. Волкова // *Известия Петербургского университета путей сообщения*. — 2025. — Т. 22. — № 3. — С. 761–775. DOI: 10.20295/1815–588X-2025–3–761–775. — EDN DENABG.
3. Akyuz E. Utilisation of cognitive map in modelling human error in marine accident analysis and prevention / E. Akyuz, M. Celik // *Safety Science*. — 2014. — Vol. 70. — Pp. 19–28. DOI: 10.1016/j.ssci.2014.05.004.
4. Zhang J. Quantitative assessment of collision risk influence factors in the Tianjin port / J. Zhang, Â. P. Teixeira, C. Guedes Soares, X. Yan // *Safety Science*. — 2018. — Vol. 110. — Pp. 363–371. DOI: 10.1016/j.ssci.2018.05.002.
5. Gil M. A bibliometric analysis and systematic review of shipboard Decision Support Systems for accident prevention / M. Gil, K. Wróbel, J. Montewka, F. Goerlandt // *Safety Science*. — 2020. — Vol. 128. — Pp. 104717. DOI: 10.1016/j.ssci.2020.104717.
6. Kodak P. İstanbul Boğazi’nda deniz kazalarının seyir emniyeti perspektifinde incelenmesi / P. Kodak, G. Kara, M. Yıldız, A. Şalcı // *İSTANBULMAKS gemi tipi önerisi. Aquatic Research*. — 2022. — Т. 5(1). — С. 63–88. DOI: 10.3153/AR22007.
7. Luo M. Half-century research developments in maritime accidents: Future directions / M. Luo, S-H. Shin // *Accident Analysis & Prevention*. — 2019. — Vol. 123. — Pp. 448–460. DOI: 10.1016/j.aap.2016.04.010.
8. Wang H. An analysis of factors affecting the severity of marine accidents / H. Wang, Z. Liu, X. Wang, T. Graham, J. Wang // *Reliability Engineering & System Safety*. — 2021. — Vol. 210. — Pp. 107513. DOI: 10.1016/j.res.2021.107513.
9. S. Erol The analysis of ship accident occurred in Turkish search and rescue area by using decision tree / S. Erol, E. Başar // *Maritime Policy & Management*. — 2015. — Т. 42. — № 4. — С. 377–388. DOI: 10.1080/03088839.2013.870357.
10. Ece N. J. Analysis of marine accidents in the strait of Çanakkale / N. J. Ece, V. Tok, I. Temiz // *Dokuz Eylül Üniversitesi Denizcilik Fakültesi Dergisi*. — 2020. — Т. 12. — С. 1–26. DOI: 10.18613/deudfd.740152.
11. Пат. 2751044 Рос. Федерация МПК В63Н 19/02, F03В 13/12 гидродинамический якорь / В. И. Сичкарев, А. С. Черенович, В. В. Кузьмин ; заяв. и патентообл. Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Сибирский государственный университет водного транспорта». — № 2020132380; заявл. 29.09.2020; опубл. 07.07.2021, Бюл. № 19. — 6 с. — EDN VXZKNG.
12. Пат. 2785310 Рос. Федерация МПК В63Н 19/02, F03В 13/12 гидродинамический якорь / В. И. Сичкарев, А. С. Черенович ; заяв. и патентообл. Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Сибирский государственный университет водного транспорта». — № 2022101769; заявл. 25.01.2022; опубл. 06.12.2022, Бюл. № 9. — 13 с. — EDN QCQCOL.
13. Пат. 2792851 Рос. Федерация МПК В63Н 19/02, F03В 13/12 гидродинамический якорь / В. И. Сичкарев, А. С. Черенович, С. В. Титов ; заяв. и патентообл. Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Сибирский государственный университет водного транспорта». — № 2022133439; заявл. 19.12.2022; опубл. 27.03.2023, Бюл. № 9. — 16 с. — EDN SOFPXE.

REFERENCES

1. Baalisampang, T., M. Dadashzadeh et al. “Review and analysis of fire and explosion accidents in maritime transportation.” *Ocean Engineering* 158 (2018): 350–366. DOI: 10.1016/j.oceaneng.2018.04.022.

2. Volkova, N. A. "An integrated approach to reducing accidents on inland waterways in the arctic region of Russia." *Proceedings of Petersburg Transport University* 22.3 (2025): 761–775. DOI: 10.20295/1815–588X-2025–3–761–775.
3. Akyuz, E. and M. Celik. "Utilisation of cognitive map in modelling human error in marine accident analysis and prevention." *Safety Science* 70 (2014): 19–28. DOI: 10.1016/j.ssci.2014.05.004.
4. Zhang, J., Â. P. Teixeira, C. Guedes Soares and X. Yan. "Quantitative assessment of collision risk influence factors in the Tianjin port." *Safety Science* 110 (2018): 363–371. DOI: 10.1016/j.ssci.2018.05.002.
5. Gil, M., K. Wróbel, J. Montewka and F. Goerlandt. "A bibliometric analysis and systematic review of shipboard Decision Support Systems for accident prevention." *Safety Science* 128 (2020): 104717. DOI: 10.1016/j.ssci.2020.104717.
6. Kodak, R., G. Kara, M. Yıldız and A. Şalcı. "İstanbul Boğazı' nda deniz kazalarının seyir emniyeti perspektifinde incelenmesi." *İSTANBULMAKS gemi tipi önerisi. Aquatic Research* 5(1) (2022): 63–88. DOI: 10.3153/AR22007.
7. Luo, M. and S.-H. Shin. "Half-century research developments in maritime accidents: Future directions." *Accident Analysis & Prevention* 123 (2019): 448–460. DOI: 10.1016/j.aap.2016.04.010.
8. Wang, H., J. Wang et al. "An analysis of factors affecting the severity of marine accidents." *Reliability Engineering & System Safety* 210 (2021): 107513. DOI: 10.1016/j.res.2021.107513.
9. Erol, S. and E. Başar. "The analysis of ship accident occurred in Turkish search and rescue area by using decision tree." *Maritime Policy & Management* 42.4 (2015): 377–388. DOI: 10.1080/03088839.2013.870357.
10. Ece, N. J., V. Tok and I. Temiz. "Analysis of marine accidents in the strait of Çanakkale." *Dokuz Eylül Üniversitesi Denizcilik Fakültesi Dergisi* 12 (2020): 1–26. DOI: 10.18613/deudfd.740152.
11. Sichkarev, V. I., A. S. Cherenovich and V. V. Kuz'min. RU 2751 044 C1, B 63 H 19/02, F 03 B 13/12. *Gidrodinamicheskii yakor'*. Russian Federation, assignee. Publ. July 7, 2021.
12. Sichkarev, V. I. and A. S. Cherenovich. RU 2785 310 C1, B 63 H 19/02, F 03 B 13/12. *Gidrodinamicheskii yakor'*. Russian Federation, assignee. Publ. December 6, 2022.
13. Sichkarev, V. I., A. S. Cherenovich, S. V. Titov et al. RU 2792 851 C1, B 63 H 19/02, F 03 B 13/12. *Gidrodinamicheskii yakor'*. Russian Federation, assignee. Publ. March 27, 2023.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Рослякова Оксана Вячеславовна —
кандидат технических наук, доцент
ФГБОУ ВО «Сибирский государственный
университет водного транспорта»
630099, Россия, Новосибирск, ул. Щетинкина, 33
e-mail: o.v.roslyakova@nsawt.ru

Кофеев Вадим Николаевич —
доцент кафедры судовождения
ФГБОУ ВО «Сибирский государственный
университет водного транспорта»
630099, Россия, Новосибирск, ул. Щетинкина, 33
e-mail: v. n.kofeev@nsawt.ru

Черенович Андрей Станиславович —
доцент кафедры судовождения
ФГБОУ ВО «Сибирский государственный
университет водного транспорта»
630099, Россия, Новосибирск, ул. Щетинкина, 33
e-mail: flot-zavoiko@mail.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Roslyakova, Oksana V. —
PhD in Technical Sciences, Associate Professor
Siberian State University of Water Transport
33 Shchetinkina str, Novosibirsk 630099,
Russian Federation
e-mail: o.v.roslyakova@nsawt.ru

Kofeev, Vadim N. —
assistant professor
Siberian State University of Water Transport
633 Shchetinkina str, Novosibirsk 630099, Russian
Federation
e-mail: v. n.kofeev@nsawt.ru

Cherenovich, Andrey S. —
Senior lecturer
Siberian State University of Water Transport
33 Shchetinkina str, Novosibirsk 630099,
Russian Federation
e-mail: flot-zavoiko@mail.ru

Статья поступила в редакцию 23 декабря 2025 г.

Received: Dec. 23, 2025

ASSESSMENT OF CALCULATION PERFORMANCE OF A NEURAL NETWORK-BASED ALGORITHM FOR BATHYMETRIC PREDICTION OF VESSEL LATITUDE

V. V. Deryabin

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

This study presents a performance comparison of two algorithms for predicting vessel latitude based on seabed depth data. The first algorithm is classical, relying on the search for a string in a depth reference matrix that is closest to current measurements according to the mean absolute error. The second algorithm is based on a neural network, which predicts vessel latitude using a sequence of measured depth values as input. The neural network model is constructed using algorithms for dataset creation, training, and testing. The network consists of ten hidden layers, each containing 200 neurons with hyperbolic tangent activation functions. A validation set is employed during training to calculate the maximum absolute error, which serves as a criterion for optimal network state. Training, validation, and test datasets are generated via pseudo-random variations of the reference depth matrix to account for sea level fluctuations and systematic measurement errors. Depth data are prepared for five different spatial steps in latitude and longitude based on a layer of spot soundings from an electronic navigational chart. For each dataset variant, the neural network is trained and its computational performance is compared to that of the classical search algorithm. Results demonstrate a significant computational advantage of the neural network for maximal reference data volume. However, as the dataset volume decreases due to increased spatial steps, this advantage diminishes, and the neural network no longer outperforms the classical method.

Keywords: vessel, latitude, depth, neural network, deep learning, autonomous navigation, seabed relief, calculation algorithm, electronic chart, navigation.

For citation:

Deryabin, Victor V. "Assessment of calculation performance of a neural network-based algorithm for bathymetric prediction of vessel latitude." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 18.1 (2026): 26–37. DOI: 10.21821/2309-5180-2026-18-1-26-37.

УДК 656.61:004.032.26

ОЦЕНКА БЫСТРОДЕЙСТВИЯ НЕЙРОСЕТЕВОГО АЛГОРИТМА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ШИРОТЫ СУДНА ПО ГЛУБИНЕ

В. В. Дерябин

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

Выполнено сравнение быстродействия двух алгоритмов определения широты местоположения судна по рельефу дна: классического алгоритма, основанного на поиске в матрице эталонных глубин строки, наиболее близкой к текущим измерениям по критерию среднего модуля ошибки, и алгоритма, созданного на основе нейронной сети, которая прогнозирует широту, принимая в качестве входного сигнала последовательность измеренных значений глубин. Для создания нейросетевой модели используются алгоритмы формирования образцов, а также обучения и тестирования. Нейронная сеть имеет десять скрытых слоев, каждый из которых содержит 200 нейронов, обладающих функцией активации в виде гиперболического тангенса. В процессе обучения используется контрольная выборка, образцы которой предназначены для расчета критерия в виде наибольшего значения модуля ошибки прогноза. Наименьшее значение указанного критерия соответствует оптимальному состоянию нейронной сети. Обучающая, контрольная и тестовая выборки формируются путем псевдослучайных изменений эталонной матрицы глубин, необходимых для учета колебаний уровня моря, а также постоянных погрешностей измерений. Набор данных о глубинах формируется для пяти различных значений пространственного шага по широте и дол-

гоме на основе слоя точечных глубин, содержащихся в электронной навигационной карте. Для каждого варианта набора данных обучается нейронная сеть, после чего выполняется сравнение быстродействия. Результаты показывают существенное преимущество нейронной сети с точки зрения скорости вычислений при максимальном объеме эталонных данных. С уменьшением объема данных, вызванным увеличением пространственного шага, вычислительное преимущество нейронной сети над поисковым алгоритмом утрачивается.

Ключевые слова: судно, широта, глубина, нейронная сеть, глубокое обучение, автономный режим, рельеф дна, алгоритм расчета, электронная карта, навигация.

Для цитирования:

Дерябин В. В. Оценка быстродействия нейросетевого алгоритма определения широты судна по глубине / В. В. Дерябин // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2026. — Т. 18. — № 1. — С. 26–37. DOI: 10.21821/2309-5180-2026-18-1-26-37. — EDN LEGQTV.

Введение (Introduction)

Задача определения координат судна по рельефу дна может быть решена на основе традиционных алгоритмов корреляционно-экстремальной навигации. Такие алгоритмы описаны, например, в работах [1] и [2]. В зарубежных источниках тема навигации по эталонным данным также широко представлена. В качестве примеров можно привести исследования [3]–[5]. Среди алгоритмов навигации по эталонным данным наиболее популярными являются классические TERCOM [4] и SITAN [6]. TERCOM (Terrain Contour Matching) принадлежит к классу поисковых алгоритмов. Из заранее записанных профилей рельефа местности выбирается тот, который наилучшим образом соответствует текущему профилю, полученному в результате измерений в режиме эксплуатации системы. Для профиля, наиболее близкого к текущему, известны не только значения высоты / глубины рельефа, но также и координат для каждой точки профиля. На основе данных о координатах определить текущее местоположение объекта не представляется сложным. SITAN (Sandia Inertial Terrain-Aided Navigation), в противоположность TERCOM, не использует процедуру поиска. Он основан на использовании алгоритма фильтрации Калмана. Уравнение измерений фильтра строится на основе линеаризации глубины как функции координат. Линеаризация выполняется в окрестности приближенной точки, в качестве которой может быть использована точка, полученная по счислению. Основной недостаток SITAN заключается в том, что данный алгоритм может расходиться (например, при больших отличиях фактического и счислимого места судна). Основное ограничение TERCOM состоит в вычислительных проблемах реализации поиска в режиме реального времени при больших объемах данных.

В качестве альтернативных инструментов решения задач навигации по рельефу дна можно рассматривать нейронные сети. В статье [7] предлагается решение задачи определения широты судна по глубинам, а в работе [8] — долготы. В исследовании [9] предлагается нейросетевая модель определения широты и долготы одновременно. Набор учебных данных для настройки такой модели формируется на основе информации о глубинах, содержащихся в электронных навигационных картах (ЭНК). В качестве преимущества нейросетевых алгоритмов навигации по рельефу дна по сравнению с классическими поисковыми указано быстродействие, которое необходимо для решения задачи навигации реального времени. Однако не приводятся какие-либо числовые оценки быстродействия нейронных сетей, которые позволили бы сравнить скорость их работы по отношению к традиционным методам. Вопрос такого сравнения быстродействия рассматривается в настоящей статье.

Методы и материалы (Methods and Materials)

Постановка задачи. Пусть на некоторой акватории имеется регулярная равномерная сетка меридианов и параллелей с пространственным шагом между узлами Δs . Пусть в каждом узле такой сетки определено значение широты φ , а также глубины акватории h , т. е. сетка характеризуется двумя эталонными матрицами:

$$H = \begin{pmatrix} h_1 & h_2 & \dots & h_p \\ h_2 & h_3 & \dots & h_{p+1} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ h_{n-p+1} & h_{n-p+2} & \dots & h_n \end{pmatrix}; \quad \Phi = \begin{pmatrix} \varphi_1 & \varphi_2 & \dots & \varphi_p \\ \varphi_2 & \varphi_3 & \dots & \varphi_{p+1} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \varphi_{n-p+1} & \varphi_{n-p+2} & \dots & \varphi_n \end{pmatrix}, \quad (1)$$

каждая строка которых имеет p элементов, что соответствует количеству промеров глубин, необходимых для определения широты. Первая строка матрицы H соответствует широте φ_p , вторая — широте φ_{p+1} и т. д.

Формирование элементов матриц H и Φ происходит следующим образом. Выбирается самый западный меридиан сетки и самая южная параллель. Рассматриваются все узлы данного меридиана в порядке возрастания широты (с юга на север). С учетом параметра p формируются l первых строк H и Φ . Затем процесс повторяется для следующего меридиана, формируются еще l строк матриц H , Φ и так до тех пор, пока не будут рассмотрены все узлы самого восточного меридиана сетки.

Пусть $H^* = \{h_i^*, h_{i+1}^*, h_{i+2}^*, \dots, h_{i+p-1}^*\}$ — последовательность значений глубин, измеренных с шагом Δs при помощи эхолота ($i = 1, 2, \dots, n - p + 1$).

В рамках традиционного *поискового метода* задача заключается в том, чтобы найти строку в эталонной матрице H , наиболее близкую к текущей измеренной последовательности глубин H^* . В качестве критерия близости выбирается средний модуль разности между текущим значением глубины и эталонным (MAD — Mean Absolute Difference).

В рамках *нейросетевого* подхода задача заключается в том, чтобы на основе H и Φ создать набор данных для обучения нейронной сети выполнять преобразование любой строки H в последний элемент соответствующей строки Φ , т. е. преобразование вида $H(j, :) \rightarrow \Phi(j, p)$, где под j следует понимать любой допустимый индекс строки матриц.

Реализации поискового и нейросетевого методов на основе выбранного языка программирования позволяют поставить компьютерный эксперимент для сравнения быстродействия указанных алгоритмов.

Поисковый алгоритм. Заключается в организации цикла, на каждой итерации которого вычисляется критерий MAD для j -й строки:

$$p \cdot \text{MAD}_j = |H^*(i) - H(j, 1)| + |H^*(i+1) - H(j, 2)| + \dots + |H^*(i+p-1) - H(j, p)|. \quad (2)$$

После рассмотрения всех строк находится минимальное значение из всех MAD_j и соответствующий индекс строки $j_{\min}$. В качестве прогнозируемого алгоритмом значения широты используется $\Phi(j_{\min}, p)$. Количество рассматриваемых строк может быть сокращено за счет информации об области неопределенности, размеры которой получаются на основе, например, счисления. Однако это требует доработки алгоритма, связанной с использованием матрицы Φ и определения процедуры исключения строк. В настоящей статье такая доработка не рассматривается, считается, что судно может находиться в любой точке акватории, на которой осуществляется навигация по рельефу дна.

Вычислительная сложность поискового алгоритма зависит от количества элементов эталонной матрицы глубин H , которое в свою очередь определяется размерами области неопределенности координат и пространственным шагом сетки.

Нейросетевой алгоритм. Для определения алгоритма на основе нейронной сети необходимо описать следующие этапы:

- 1-й этап — выбор архитектуры сети;
- 2-й этап — алгоритм формирования образцов (набора учебных данных);
- 3-й этап — алгоритм настройки (обучения) сети;
- 4-й этап — алгоритм проверки работоспособности (тестирования).

Сформулированную ранее нейросетевую задачу определения широты места по рельефу дна можно рассматривать как задачу приближения (аппроксимации) функции многих переменных.

Действительно, в качестве независимых переменных выступают значения глубины, измеренные в текущий и предшествующие моменты времени, а роль зависимой переменной выполняет значение широты на момент последнего поступившего измерения глубины. С задачей аппроксимации тесно связана задача регрессии, которая заключается в том, чтобы по эмпирическим данным восстановить исходную зависимость одной величины от других. Как известно (см., например, [10], [11]), для решения задач аппроксимации функций могут использоваться полносвязные нейронные сети прямого распространения. Такие сети состоят из одного (или нескольких) скрытых слоев и одного выходного слоя. Каждый нейрон предыдущего слоя передает сигнал на каждый нейрон последующего слоя, причем обратное движение сигнала не допускается. Параметрами архитектуры такой сети являются:

- количество скрытых слоев;
- количество нейронов в каждом скрытом слое;
- тип и параметры функции активации нейронов.

Кроме того, архитектура определяется видом входного и выходного сигналов сети, которые уже были определены исходя из формулировки задачи. Входной вектор имеет p компонент, а на выходе сети получается широта судна, соответствующая моменту измерения последней глубины.

После выбора архитектуры возникает задача формирования набора учебных (эталонных) данных, на основе которых будет выполняться оптимизация параметров сети (весовых и пороговых коэффициентов). Набор учебных данных формируется либо на основе промеров глубин в узлах регулярной сетки на акватории, либо на основе имеющихся данных о глубинах, содержащихся, например, в ЭНК, используемых для навигации совместно с ЭКНИС. Последний вариант удобен тем, что нет необходимости в проведении специальных промеров. В дальнейшем будет рассматриваться именно этот способ.

В векторных электронных картах (ЭНК), выпускаемых в соответствии со стандартом МГО S-57, имеется слой глубин SOUNDG. Данные в этом слое хранятся в виде троек чисел (широта, долгота, глубина) и могут быть извлечены при помощи специального программного обеспечения. Конечно, промеры глубин вряд ли будут выполнены точно в узлах регулярной сетки, поэтому возникает задача интерполяции. В результате могут быть сформированы эталонные матрицы вида (1), принцип формирования которых в общих чертах был описан ранее при постановке задачи. Параметрами такого алгоритма являются пространственный шаг сетки Δs , а также координаты ее границы:

- широта южной параллели φ_S ;
- широта северной параллели φ_N ;
- долгота западного меридиана λ_W ;
- долгота восточного меридиана λ_E .

Указанные параметры определяют число узлов сетки, т. е. в конечном итоге элементов как матрицы H , так и матрицы Φ . На основе указанных матриц формируется набор учебных данных, т. е. пар по типу «вход-выход». В качестве входного образца пары выступает последовательность p измеренных глубин при движении с юга на север с шагом Δs (j -я строка H), а в качестве выходного берется значение широты в узле (элемент $\Phi(j, p)$ эталонной матрицы широты). Такой набор учебных данных будет называться в дальнейшем *базовым*.

Необходимо остановиться более подробно на алгоритме формирования матриц H и Φ , на основе которых формируется базовый набор. В общем виде он может быть представлен следующим псевдокодом:

```

широта =  $\varphi_S$ 
долгота =  $\lambda_W$ 
 $i = 1; j = 1$ 
пока долгота  $\leq \lambda_E$ :
    пока широта  $\leq \varphi_N$ :
         $S(i, j) = \text{глубина}$  {= интерполяция для (широта, долгота)}

```

$LAT(i, j) = \text{широта}$

$j = j + 1$

широта = широта + $\Delta\varphi$

долгота = долгота + $\Delta\lambda$

$i = i + 1$

На итерациях вложенного цикла по широте происходит наполнение строк двух вспомогательных матриц: LAT — матрицы значений широты и соответствующей ей матрицы глубины S. Каждый элемент матрицы S есть глубина акватории в точке с широтой, которая равна элементу матрицы LAT с теми же индексами. Например, S(2, 10) есть значение глубины в точке с широтой LAT(2, 10), S(3, 16) — в точке с широтой LAT(3, 16) и т. д. Следует отметить, что первый индекс обозначает номер меридиана (нумерация начинается с западного меридиана района плавания). Далее на основе матриц S и LAT формируются матрицы H и Ф.

Шаг изменения по широте $\Delta\varphi$ определяется как отношение $\Delta s / M_N$, где M_N — радиус кривизны меридианного эллипса в точке с широтой φ_N . Как известно, радиус кривизны меридиана увеличивается при движении от экватора к полюсу, поэтому на параллели, ограничивающей акваторию с севера, он будет принимать большее значение, чем на параллели, ограничивающей акваторию с юга, если плавание происходит в северном полушарии. Это означает, что при рассчитанном таким образом $\Delta\varphi$ расстояние между узлами по меридиану будет гарантированно не больше, чем Δs для всего района навигации. Точнее, расстояние между узлами в окрестности северной параллели будет Δs , а в окрестности южной (в северном полушарии) оно будет меньше при одном и том же значении $\Delta\varphi$.

В свою очередь, шаг изменения по долготу $\Delta\lambda = \Delta s / r_s$, где r_s — радиус южной параллели района плавания (с широтой φ_s). При плавании в северном полушарии радиус более южной параллели больше, чем радиус более северной, поэтому рассчитанная таким образом $\Delta\lambda$ будет на южной параллели соответствовать расстоянию между узлами Δs , а на северной параллели такое расстояние будет меньше, в чем, в принципе, выражается сферическое схождение меридианов.

Использование северного радиуса кривизны меридиана и радиуса южной параллели района плавания, расположенного в северном полушарии, условно обеспечивает заявленное пространственное разрешение между узлами регулярной сетки глубин. Ввиду вариаций радиуса кривизны меридиана и параллели для произвольной точки в пределах области плавания фактическое расстояние между узлами не будет постоянным и равным Δs . Значение Δs будет почти обеспечиваться в меридиональном направлении в северных участках. В направлении по параллели Δs будет приближенно наблюдаться в южных районах. Если район плавания имеет небольшие размеры, то такими вариациями можно пренебречь и приближенно считать сетку равномерной. При этом возникает вопрос: *будет ли неравномерность сетки каким-либо образом влиять на практическое использование модели.* Для ответа на этот вопрос необходимо понимать, как будет использоваться данная батиметрическая модель в режиме эксплуатации.

В данном случае возможны два варианта, основанные, тем не менее, на счислении пути судна. Счисление призвано определять моменты времени, когда необходимо выполнять промеры. Первый вариант предусматривает, что промеры необходимо делать через каждые Δs , пройденные в направлении с юга на север. Понятно, что в режиме эксплуатации Δs определяется по счислению. При таком варианте в случае неравномерной сетки расстояние между узлами увеличивается при движении с юга на север, поэтому используя одно и то же значение Δs , невозможно попасть в те узлы, для которых определены глубины, даже если счисление является абсолютно точным. Поэтому в таком случае более предпочтительным представляется вариант, когда счисление для определения моментов измерения глубин ведется не по расстоянию, а по приращению широты. По достижении разности широт $\Delta\varphi$ выполняется промер, разность широт обнуляется, затем снова рассчитывается разность широт, по достижении $\Delta\varphi$ фиксируется глубина и т. д. При таком варианте при абсолютно точном счислении промеры будут выполнены в точности в узлах сетки при условии, что судно идет строго по меридиану.

При определении $\Delta\varphi$ и $\Delta\lambda$ используются значения радиуса кривизны меридиана и первого вертикала (для расчета радиуса параллели), т. е. задача рассматривается на общеземном эллипсоиде. Поэтому в качестве параметров алгоритма формирования образцов необходимо рассматривать параметры такого эллипсоида, например, большую полуось a и эксцентриситет e .

Базовый набор может использоваться для задач обучения сети, так как он содержит всю эталонную информацию о соотношении между глубинами и их местоположением. Однако он не учитывает возможные отклонения входных последовательностей от эталонных. Такие отклонения возможны вследствие изменения уровня моря (приливы, ветровые явления), постоянных систематических ошибок эхолота, допускаемых как на этапе промеров, так и на этапе использования нейросетевой системы. Чтобы подготовить сеть к подобным смещениям, следует учитывать их при формировании учебных данных путем использования r_1 псевдослучайных видоизменений (вариантов) эталонной матрицы глубины H . Каждое такое видоизменение является суммой H и некоторой псевдослучайной скалярной величины e , представляющей собой изменение уровня моря и принимающей значение из отрезка $[e_{\min}, e_{\max}]$. Следует отметить, что для каждого искаженного варианта матрицы глубины H матрица Φ используется без искажений, чтобы сеть была готова к одному выходному значению при различных вариациях входных. Базовый набор учебных данных, дополненный псевдослучайными видоизменениями матрицы глубин, будет в дальнейшем называться *расширенным набором*.

Расширенный набор учебных данных используется непосредственно для определения оптимальных значений настраиваемых коэффициентов нейронной сети. Он представляет собой обучающую выборку. Помимо обучающей выборки многие задачи требуют наличия *контрольной* выборки, образцы которой отличаются от образцов обучающей и не принимают прямого участия в коррекции коэффициентов сети. Контрольная выборка формируется на основе дополнительных r_2 псевдослучайных видоизменений (вариантов) эталонной матрицы глубины H . Ее образцы используются для расчета метрик, характеризующих качество работы сети в процессе обучения. Лучшее состояние нейросети сохраняется только в соответствии с такими контрольными метриками. Этот контроль необходим для предотвращения переобучения сети, обеспечения ее *робастности* в дальнейшем (в режиме эксплуатации). Следует отметить, что иногда понятие «набор учебных данных» включает как обучающую, так и контрольную выборки, но в рамках настоящей статьи будем пользоваться установленной терминологией в том варианте, который представлен ранее.

Для формирования расширенного набора учебных данных также необходимо задать $h_{\min}$ — наименьшее допустимое для навигационных целей значение глубины и $\min$, $\max$ -границы промежутка масштабирования. Таким образом, в число параметров алгоритма формирования набора учебных данных входят:

- идентификатор источника данных;
- широта южной параллели φ_S ;
- широта северной параллели φ_N ;
- долгота западного меридиана λ_W ;
- долгота восточного меридиана λ_E ;
- пространственный шаг сетки Δs (предполагается одинаковым как для широты, так и долготы);
- параметры общеземного эллипсоида;
- количество глубин p , необходимое для прогнозирования широты;
- границы отрезка $[e_{\min}, e_{\max}]$;
- количество видоизменений эталонной матрицы для обучающей (r_1) и контрольной (r_2) выборок;
- минимальная глубина $h_{\min}$;
- параметры масштабирования $\min$, $\max$.

После формирования расширенного набора учебных данных можно приступить к процедуре обучения (настройки) нейронной сети. Процедура обучения включает в общем случае два

последовательно сменяющих друг друга этапа. *Первый этап* связан с непосредственной настройкой коэффициентов нейронной сети в соответствии с задачей минимизации целевой функции, в качестве которой обычно выступает средний квадрат ошибки. Выбор среднего квадрата ошибки в качестве метрики оптимизации является целесообразным по двум причинам: во-первых, средний квадрат ошибки удобен с теоретической точки зрения в рамках алгоритма обратного распространения ошибки (целевая функция получается дифференцируемой); во-вторых, критерий устойчив к грубым ошибкам (промахам), содержащимся в выходных образцах. Если при наличии промахов использовать максимальный модуль ошибки, то при наличии хотя бы одного промаха сеть будет непосредственно ориентироваться на него при обучении, так как он вносит прямой вклад в целевую функцию. В случае среднего квадрата целевая функция также будет искажаться, но намного меньше ввиду процедуры осреднения.

Второй этап связан с проверкой обобщающих свойств сети по мере обучения. По прошествии N_{it} итераций обучения (эпох) вычисляется значение метрики для образцов контрольной выборки. В качестве таковой может использоваться средний квадрат ошибки, но в рамках контроля для выбора метрики имеется больше свободы, так как возникает задача только ее вычисления. Например, можно использовать средний или максимальный модуль ошибки прогноза (при доверии к выходным образцам), корень из среднего квадрата ошибки. Лучшее состояние сети соответствует той эпохе, для которой было зафиксировано лучшее значение метрики, рассчитанное для образцов контрольной выборки. Если для обучающей и контрольной выборок используются одинаковые метрики, то ухудшение таковой для контрольной выборки по мере улучшения для обучающей свидетельствует о том, что происходит переобучение сети, т. е. сеть просто запоминает данные из обучающей выборки в ущерб точности для других образцов, находящихся вне ее. На практике это приводит к тому, что не обеспечивается робастность сети. Если для обучающей и контрольной выборок метрики разные, то описанное расхождение в характере их изменения не обязательно сигнализирует о переобучении. Алгоритм обучения минимизирует только метрику, рассчитываемую для образцов обучающей выборки, а изменение других метрик (как для обучающей, так и контрольной выборки) не является целью оптимизации, поэтому может носить несогласованный характер.

Непосредственная минимизация среднего квадрата ошибки выполняется в рамках определенного алгоритма настройки, который по отношению к общей итерационной процедуре обучения, включающей проверку обобщения, можно условно назвать *локальным*. Как правило, такие алгоритмы строятся на основе градиентных методов оптимизации, призванных находить локальные, а не глобальные минимумы целевой функции. Поэтому алгоритм часто может стать «локальным» исходя в том числе из указанных соображений.

Необходимо также задать критерий прекращения обучения — *критерий останова*, в качестве которого могут использоваться:

- максимальное время работы алгоритма;
- максимальное количество итераций N_{max} ;
- максимально допустимое значение метрики на контрольной выборке;
- наименьшее допустимое значение изменения метрики (от эпохи к эпохе) на обучающей выборке.

В рамках настоящего исследования в качестве критерия останова используется N_{max} .

Таким образом, определяется следующий перечень параметров алгоритма настройки нейронной сети:

- количество итераций для проверки обобщения N_{it} (1 — проверка на каждой итерации, 2 — проверка через одну итерацию, 3 — проверка через две итерации и т. д.);
- критерий останова N_{max} ;
- метрика для обучающей выборки;
- метрика для контрольной выборки;
- вид локального алгоритма обучения и его параметры;
- размер мини-пакета.

Следует отметить, что выбранная метрика для обучающей выборки должна поддерживаться локальным алгоритмом обучения.

После обучения нейронной сети и получения оптимального набора ее настраиваемых параметров возникает задача проверки ее работоспособности или тестирования. Тестирование может быть выполнено в рамках процедуры моделирования, предполагающей, например, виртуальное движение конкретного судна (с учетом гидро- и аэродинамических характеристик) по району плавания либо кинематическое моделирование движения безотносительно к конкретному судну. В простейшем случае тестовые образцы могут быть сформированы точно так же, как для контрольной выборки. Для данного варианта единственным параметром является r_3 — количество псевдослучайных видоизменений (вариантов) эталонной матрицы глубины H .

Результаты (Results)

Используя язык программирования Python и соответствующие библиотеки, включая библиотеку TensorFlow вер. 2.16.1 (Keras), реализуем описанные в предыдущем разделе статьи нейросетевой и поисковый алгоритм. Для реализации нейросетевого алгоритма необходимо задать параметры архитектуры сети, алгоритмов формирования образцов, обучения и тестирования.

Параметры архитектуры нейронной сети задаются следующим образом:

- количество скрытых слоев = 10;
- количество нейронов в каждом из скрытых слоев = 200;
- тип и параметры функции активации нейронов: для скрытых нейронов — гиперболический тангенс (параметры — по умолчанию в TensorFlow), для выходного нейрона — тождественная функция активации.

Параметры алгоритма формирования набора учебных данных задаются следующим образом:

- идентификатор источника данных: ЭНК US4SC31M;
- широта южной параллели $\varphi_S = 32^\circ 52,5' N$;
- широта северной параллели $\varphi_N = 33^\circ 12,6' N$;
- долгота западного меридиана $\lambda_W = 079^\circ 05,8' W$;
- долгота восточного меридиана $\lambda_E = 078^\circ 41,9' W$;
- пространственный шаг сетки $\Delta s = 0,1$ мили (предполагается одинаковым как для широты, так и для долготы);
- параметры общеземного эллипсоида: WGS-84;
- количество глубин $p = 20 + 1$, необходимое для прогнозирования широты;
- границы отрезка $[e_{\min}, e_{\max}] = [-1, +1]$ м;
- количество видоизменений эталонной матрицы для обучающей ($r_1 = 100$) и контрольной ($r_2 = 100$) выборок;
- минимальная глубина $h_{\min} = 1$ м;
- параметры масштабирования $\min = -1, \max = +1$.

При реализации алгоритма формирования набора учебных данных размер акватории для навигации по глубинам составил приблизительно 20×20 морских миль. Нестабильность пространственного разрешения, из-за влияния геометрии эллипсоида, составляет 185,19–185,2 м по широте, и 184,5–185,2 м по долготе. Как видно, наибольшие значения в точности соответствуют заданному шагу $\Delta s = 0,1$ мили.

Перечень параметров алгоритма настройки нейронной сети имеет следующий вид:

- количество итераций для проверки обобщения $N_{it} = 1$;
- критерий останова $N_{\max} = 1000$;
- метрика для обучающей выборки: средний квадрат ошибки;
- метрика для контрольной выборки: наибольший модуль ошибки;
- вид локального алгоритма обучения: Adamax (см. [12]), параметры взяты по умолчанию в TensorFlow;
- размер мини-пакета 100.

Алгоритм тестирования имеет единственный параметр $r_3 = 1000$.

В результате обучения оказалось, что минимальное значение наибольшего модуля ошибки было получено на 314-й итерации и составило $0,023713^\circ$. На тестовой выборке значение данного показателя получено $0,201002^\circ$, что составляет около 12 миль. Средний модуль погрешности прогноза составляет чуть менее $6,0 \cdot 10^{-4}^\circ$, что, в свою очередь, не превосходит 0,04 мили (74,08 м). Таким образом, результаты тестирования позволяют сделать вывод лишь о приемлемой средней точности нейросетевой системы.

Поисковый алгоритм на основе формулы (2) также был реализован на языке Python. Выполним сравнение его быстродействия с нейросетевым алгоритмом. Компьютерный эксперимент сравнения быстродействия заключается в следующем. В рабочее пространство загружаются:

- матрицы H и Φ (необходимы для поискового алгоритма);
- коэффициенты нейронной сети;
- входные образцы тестовой выборки.

Затем вычисляется время работы участков кода, соответствующих нейросетевому и поисковому алгоритмам. Используется функция `time()` модуля `time`. Фиксируется время непосредственно перед началом исполнения кода алгоритма и сразу после его завершения. Разница моментов времени представляет собой время работы алгоритма. Алгоритмы обрабатывают последовательно по 1000 одних и тех же входных образцов из тестовой выборки. Такое количество представляется достаточным, чтобы обеспечить достоверность оценки времени работы каждого из алгоритмов. В результате было получено следующее время работы: 114 с — для поискового алгоритма; 25 с — для нейросетевого алгоритма.

Таким образом, преимущество нейросетевого алгоритма в плане обеспечения быстродействия в рассмотренной ситуации очевидно. Понятно, что время работы поискового алгоритма напрямую зависит от размера матрицы H , который, в свою очередь, определяется пространственным шагом Δs . Поэтому целесообразно рассмотреть другие большие значения Δs : 0,2; 0,3; 0,4 и 0,5. Результаты обучения и тестирования для таких вариантов представлены в табл. 1.

Таблица 1

Результаты обучения и тестирования нейронной сети

Δs , мили	Обучение		Тестирование	
	Наименьший максимум модуля ошибки, $^\circ$	Номер итерации минимального максимума	Наибольший модуль ошибки, $^\circ$	Средний модуль ошибки, $^\circ$
0,1	$2,4 \cdot 10^{-2}$	314	0,201002	$6,0 \cdot 10^{-4}$
0,2	$1,4 \cdot 10^{-3}$	854	$9,6 \cdot 10^{-3}$	$1,9 \cdot 10^{-4}$
0,3	$1,8 \cdot 10^{-4}$	526	$5,0 \cdot 10^{-4}$	$9,3 \cdot 10^{-5}$
0,4	$4,4 \cdot 10^{-5}$	902	$1,0 \cdot 10^{-4}$	$2,0 \cdot 10^{-5}$
0,5	$1,8 \cdot 10^{-5}$	927	$6,5 \cdot 10^{-5}$	$1,0 \cdot 10^{-5}$

Для каждого варианта Δs необходимо повторить эксперимент по сравнению вычислительной сложности алгоритмов. Результаты приведены в табл. 2.

Таблица 2

Сравнение вычислительной сложности алгоритмов

Δs , мили	Количество образцов базового набора (строк H)	Время работы алгоритма (1000 образцов), с	
		Поисковый	Нейросетевой
0,1	36562	113,5	25,1
0,2	8181	25,9	25,0
0,3	3196	9,7	24,9
0,4	1581	4,8	25,0
0,5	861	2,7	24,8

Из данных табл. 2 следует, что только при $\Delta s = 0,1$ мили нейросетевой алгоритм обеспечивает явное преимущество в плане быстродействия по отношению к классическому поисковому способу. Нейронная сеть позволяет обработать данные примерно в 4,5 раза быстрее. При увеличении Δs время работы поискового алгоритма ожидаемо снижается, и при $\Delta s = 0,2$ поисковый алгоритм уже почти не уступает по скорости вычислений нейросетевому. При $\Delta s = 0,3; 0,4; 0,5$ нейронная сеть считает заметно медленнее. Следует заметить, что скорость работы нейросетевого алгоритма остается стабильной (около 25 с) и не зависит от пространственного шага Δs . Указанное объясняется тем, что во всех рассмотренных случаях параметры архитектуры сети (количество и тип нейронов, число слоев, размерность входа p) остаются неизменными, а именно эти параметры и определяют скорость вычислений. Для одной и той же сети в вычислительном плане нет разницы, через какой шаг Δs сформированы компоненты входного сигнала, если их количество p не меняется.

Обсуждение (Discussion)

Анализ данных, приведенных в табл. 1, позволяет сделать ряд выводов, относящихся к адекватности прогноза нейронной сетью широты судна. Во-первых, очевидна закономерность: чем больше пространственный шаг Δs , тем лучше точность прогноза. Во-вторых, указанная точность относится как к метрике в виде наибольшего, так и среднего модуля ошибки прогноза. Иными словами, оба показателя точности монотонно убывают с увеличением пространственного шага. В-третьих, такой же характер изменения точности (в виде наибольшего модуля ошибки) справедлив и для образцов контрольной выборки, что говорит в пользу адекватности процедуры обучения. При этом размер тестовой выборки в 10 раз превышает размер контрольной.

Полученные результаты выполнены для одной ЭНК и представляют собой пример расчетной процедуры, которая может использоваться в следующих целях:

- эмпирическое определение пространственного шага, дающего наилучшую точность для заданного набора эталонных данных;
- эмпирическое определение того, насколько целесообразно использовать нейронную сеть для решения задачи (например, в данном случае нейросеть работает быстрее только при $\Delta s = 0,1$ мили).

Не отрицается, что навигационный компьютер может в ряде случаев (зависит от объема эталонных данных) решить задачу определения координаты по глубине в реальном времени с использованием классического поиска по эталонной матрице, но если нейронная сеть умеет делать это быстрее, то она позволяет использовать менее требовательное в вычислительном плане оборудование, возможностей которого хватает для реализации нейросетевого алгоритма, но не хватает для классического. Таким образом, понижаются требования к быстродействию аппаратного обеспечения, а освободившиеся ресурсы можно использовать для решения других задач.

Следует также отметить, что приведенные результаты сравнения быстродействия справедливы, когда и нейронная сеть, и классический алгоритм реализованы на обычном компьютере с традиционной архитектурой процессора (вычисления выполняются последовательно). Если использовать специализированные нейропроцессоры, то можно достичь лучших результатов в смысле быстродействия нейронной сети.

Заключение (Conclusion)

Настоящее исследование ставит целью оценить быстродействие нейросетевого алгоритма определения широты места судна по глубине. Для достижения указанной цели определяется архитектура нейронной сети, а также алгоритмы формирования образцов, настройки (обучения) и тестирования. После задания параметров архитектуры и указанных алгоритмов создаются соответствующие нейросетевые модели для различных значений шага регулярной сетки и их работа сравнивается в плане быстродействия с работой классического поискового алгоритма, который основан на поиске строки глубин в эталонной матрице, наиболее близкой к текущим измерениям

при помощи эхолота. Результаты сравнения показывают, что сеть может работать как быстрее, так и медленнее классического алгоритма (это зависит от объема эталонных данных о глубинах на заданной акватории). Объем данных, в свою очередь, определяется размерами района навигации и пространственным шагом, через который фиксируются глубины. По мере увеличения объема данных быстродействие сети повышается по сравнению с поисковым алгоритмом и наоборот.

В качестве направлений дальнейших исследований можно определить следующее. Во-первых, необходима разработка алгоритма поиска оптимальной архитектуры нейронной сети, параметры которой определяются числом слоев, нейронов, количеством глубин для прогноза и другими величинами. Поиск оптимальной конфигурации должен выполняться для конкретного набора данных конкретной акватории. Во-вторых, оптимальная конфигурация должна учитывать также быстродействие, т. е. она должна быть наименее сложной в вычислительном плане, но в то же время обеспечивать требуемую навигационную точность. В-третьих, представляется целесообразным исследование возможности реализации нейросетевых алгоритмов навигации судна по глубинам с использованием специализированного аппаратного обеспечения на основе нейропроцессоров.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ключева С. Ф. Синтез алгоритмов батиметрических систем навигации / С. Ф. Ключева, В. В. Завьялов. — Владивосток: Мор. гос. ун-т имени Г. И. Невельского, 2013. — 131 с.
2. Степанов О. А. Методы оценки потенциальной точности в корреляционно-экстремальных навигационных системах: аналитический обзор / О. А. Степанов. — Санкт-Петербург: Концерн «Центральный научно-исследовательский институт “Электроприбор”», 1993. — 84 с.
3. Ma D. A robust fusion terrain-aided navigation method with a single beam echo sounder / D. Ma, T. Ma, Y. Li, Y. Ling, Y. Ben // *Ocean Engineering*. — 2023. — Vol. 286. — Pp. 115610. DOI: 10.1016/j.oceaneng.2023.115610.
4. Golden J. P. Terrain Contour Matching (TERCOM): A Cruise Missile Guidance Aid / J. P. Golden // *Image Processing for Missile Guidance* — 0238 — SPIE, 1980. — Pp. 10–18. DOI: 10.1117/12.959127.
5. Pat. 3212189 US Patent Office, G01C 21/20 Marine navigation procedure / Savit C. H. — Publ. 19.10.1965.
6. Longenbaker W. E. Terrain-aided navigation of an unpowered tactical missile using autopilot-grade sensors / W. E. Longenbaker // *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*. — 1984. — Vol. 7. — Is. 2. — Pp. 175–182. DOI: 10.2514/3.8564.
7. Дерябин В. В. Определение широты места судна по глубинам на основе нейронной сети / В. В. Дерябин, А. Е. Сазонов // *Вестник государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова*. — 2025. — Т. 17. — № 1. — С. 94–104. DOI: 10.21821/2309-5180-2025-17-1-94-104. — EDN KCJFZV.
8. Дерябин В. В. Определение долготы места судна по глубинам при помощи нейронной сети / В. В. Дерябин // *Вестник государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова*. — 2025. — Т. 17. — № 4. — С. 481–492. DOI: 10.21821/2309-5180-2025-17-4-481-492. — EDN CJWYZX.
9. Дерябин В. В. Нейросетевое решение задачи определения места судна по рельефу дна / В. В. Дерябин // *Транспортное дело России*. — 2024. — № 2. — С. 257–260. — EDN DVCMJY.
10. Wang M.-X. Approximation capabilities of neural networks on unbounded domains / M.-X. Wang, Y. Qu // *Neural Networks*. — 2022. — Vol. 145. — Pp. 56–67. DOI: 10.1016/j.neunet.2021.10.001.
11. Горбань А. Н. Обобщенная аппроксимационная теорема и вычислительные возможности нейронных сетей / А. Н. Горбань // *Сибирский журнал вычислительной математики*. — 1998. — Т. 1. — № 1. — С. 11–24. — EDN PRZOML.
12. Kingma D. P. Adam: A Method for Stochastic Optimization / D. P. Kingma, J. Ba // *3rd International Conference on Learning Representations*, 2017. DOI: 10.48550/arXiv.1412.6980.

REFERENCES

1. Klyueva, S. F., and V. V. Zav'yalov. *Sintez algoritmov batimetriceskikh sistem navigatsii*. Vladivostok: Mor. gos. un-t imeni G. I. Nevel'skogo, 2013.

2. Stepanov, O. A. *Metody otsenki potentsial'noy tochnosti v korrelyatsionno-ekstremal'nykh navigatsionnykh sistemakh: Analiticheskiy obzor*. Sankt-Peterburg: "Kontsern "Tsentral'nyy nauchno-issledovatel'skiy institut "Elektropribor", 1993.
3. Ma, D., Y. Ben et al. "A robust fusion terrain-aided navigation method with a single beam echo sounder." *Ocean Engineering* 286 (2023): 115610. DOI: 10.1016/j.oceaneng.2023.115610.
4. Golden, J. P. "Terrain Contour Matching (TERCOM): A Cruise Missile Guidance Aid." *Image Processing for Missile Guidance* — 0238SPIE, 1980: 10–18. DOI: 10.1117/12.959127.
5. Savit, Carl H. U.S. 3 212 189, IPC G 01 C 21/20. Marine navigation procedure. Publ. 19 Oct. 1965.
6. Longenbaker, W. E. "Terrain-aided navigation of an unpowered tactical missile using autopilot-grade sensors." *Journal of Guidance, Control, and Dynamics* 7.2 (1984): 175–182. DOI: 10.2514/3.8564.
7. Deryabin, V. V. and A. E. Sazonov. "Depth-aided prediction of vessel latitude based on a neural network." *Vestnik gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 17.1 (2025): 94–104. DOI: 10.21821/2309-5180-2025-17-1-94-104.
8. Deryabin, V. V. "Depth-aided prediction of a vessel's longitude using a neural network." *Vestnik gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 17.4 (2025): 481–492. DOI: 10.21821/2309-5180-2025-17-4-481-492.
9. Deryabin, V. V. "Neural net-based bathymetric solution of vessel position fixing." *Transport Business in Russia* 2 (2024): 257–260.
10. Wang, M.-X. and Y. Qu. "Approximation capabilities of neural networks on unbounded domains." *Neural Networks* 145 (2022): 56–67. DOI: 10.1016/j.neunet.2021.10.001.
11. Gorban', A. N. "Obobshchennaya approksimatsionnaya teorema i vychislitel'nye vozmozhnosti neyronnykh setey." *Sibirskiy zhurnal vychislitel'noy matematiki* 1.1 (1998): 11–24.
12. Kingma, D. P. and J. Ba. "Adam: A Method for Stochastic Optimization." *3rd International Conference on Learning Representations*, 2017. DOI: 10.48550/arXiv.1412.6980.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

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

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

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

*Статья поступила в редакцию 25 ноября 2025 г.
Received: Nov. 25, 2025.*

GRADIENT-BASED APPROACH TO FORMALIZING THE DISTANCE AT THE CLOSEST POINT OF APPROACH FOR SHIP COLLISION AVOIDANCE PROBLEM

A. S. Zhuk¹, A. A. Mironenko²

¹ Admiral Ushakov State Maritime University, Novorossiysk, Russian Federation

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

This study develops a gradient-based formalization of the closest point of approach (CPA) distance of ships, intended as a foundation for analyzing navigational situations and planning collision avoidance maneuvers. The relevance of the study stems from the necessity for a rigorous, clear, and visually interpretable description of the CPA distance. The research investigates the process of ship collision avoidance and examines the properties of the scalar field of the CPA distance within the space of controlled ship speed components along both the meridian and the parallel. The objective of the work is to obtain a gradient-based representation of the CPA distance and to interpret the resulting data from the perspective of practical navigation. The methods employed comprise established mathematical approaches in navigation, which describe navigational parameters through the magnitude and direction of their gradients, as well as the geometric interpretation of both the scalar field of the CPA distance and the vector field of its gradient. Both the magnitude and direction of the CPA gradient are explicitly determined, and their relationship with the time to CPA and the geometry of CPA isolines is systematically analyzed. The study demonstrates that the orthogonality of the gradient relative to the corresponding isolines provides a natural and effective basis for selecting the most appropriate collision avoidance maneuver. Moreover, the research substantiates the use of gradient-based formalization in collision risk assessment and the design of algorithms for ship collision avoidance. The main conclusions confirm that the CPA gradient possesses independent navigational significance and should be regarded as a fundamental characteristic of the ship collision avoidance process, providing both analytical insight and practical guidance for the safe and efficient maneuvering of controlled vessels within their navigational domain.

Keywords: CPA distance, isoline, scalar field, gradient vector field, ship collision avoidance, maneuver planning, collision risk assessment, collision avoidance maneuver, automated systems, own ship, ship domain

For citation:

Zhuk, Alexander S. and A. A. Mironenko. "Gradient-based approach to formalizing the distance at the closest point of approach for ship collision avoidance problem." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 18.1 (2026): 38–48. DOI: 10.21821/2309-5180-2026-18-1-38-48.

УДК 656.61.052

ГРАДИЕНТНЫЙ ПОДХОД К ФОРМАЛИЗАЦИИ ДИСТАНЦИИ КРАТЧАЙШЕГО СБЛИЖЕНИЯ В ЗАДАЧЕ РАСХОЖДЕНИЯ СУДОВ

А. С. Жук¹, А. А. Мироненко²

¹ ФГБОУ ВО «Государственный морской университет имени адмирала Ф. Ф. Ушакова»,
г. Новороссийск, Российская Федерация

² ФГБОУ ВО «Государственный университет морского и речного флота
имени адмирала С. О. Макарова», г. Санкт-Петербург, Российская Федерация

Целью исследования является разработка градиентной формализации параметра дистанции кратчайшего сближения судов как основы для анализа навигационной ситуации и планирования маневров предотвращения столкновений. Актуальность исследования обусловлена необходимостью строгого и наглядного описания параметра дистанции кратчайшего сближения. Выполнено исследование процесса расхождения судов и свойства скалярного поля параметров дистанции кратчайшего сближения в пространстве компонент скорости управляемого судна по меридиану и параллели. Целью работы является получение градиентного описания параметра дистанции кратчайшего сближения судов и интерпретация полученных результатов с позиций

практического судовождения. В качестве основных методов используются широко известные из математических основ судовождения методы описания навигационных параметров через модуль и направление их градиентов, а также геометрическая интерпретация скалярного поля параметра и векторного поля градиента параметра. В явном виде определены модуль и направление градиента дистанции кратчайшего сближения судов, показана его связь с параметром времени кратчайшего сближения и с геометрией изолиний параметров кратчайшего сближения. Отмечается, что свойство ортогональности градиента соответствующим изолиниям может служить естественным обобщением выбора наиболее эффективного маневра расхождения судов. В результате исследования обоснована возможность использования градиентной формализации в задачах оценки опасности столкновения и синтеза алгоритмов расхождения судов. Основные выводы подтверждают, что градиент параметра дистанции кратчайшего сближения обладает самостоятельным навигационным смыслом и может рассматриваться как фундаментальная характеристика процесса расхождения судов.

Ключевые слова: дистанция кратчайшего сближения, изолиния, скалярное поле параметра, векторное поле градиента, предотвращение столкновений судов, планирование маневра, оценка опасности столкновения, маневр расхождения судов, автоматизированные системы, управляемое судно, зона навигационной безопасности.

Для цитирования:

Жук А. С. Градиентный подход к формализации дистанции кратчайшего сближения в задаче расхождения судов / А. С. Жук, А. А. Мироненко // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2026. — Т. 18. — № 1. — С. 38–48. DOI: 10.21821/2309-5180-2026-18-1-38-48. — EDN LSQGYK.

Введение (Introduction)

Предотвращение столкновений судов остается одной из ключевых задач современного судовождения, особенно в районах с интенсивным движением. В практическом судовождении для количественной оценки опасности при сближении судов традиционно используется понятие *зоны навигационной безопасности* (ЗНБ), которая для упрощения технической реализации формализуется круговой формой, через дистанцию кратчайшего сближения $D_{кр}$. В исследованиях по предотвращению столкновений судов [1–3] параметр $D_{кр}$ широко используется в аналитических моделях относительного движения судов [4–6], алгоритмах поддержки принятия решений автоматизированных систем [7–10], а также для классификации ситуаций сближения судов и определения степени опасности применяется совместно с $T_{кр}$. Однако, несмотря на широкое применение $D_{кр}$ в практических расчетах и навигационных приборах, этот параметр следует рассматривать исключительно как скалярную величину. Безусловно, подобный подход ограничивает возможности оценивания изменения степени опасности столкновения при варьировании псевдоуправлений (изменении курса и / или скорости управляемого судна). В отличие от навигационных параметров (пеленг на ориентир, дистанция до ориентира) $D_{кр}$ редко интерпретируется в терминах теории поля.

Существуют подходы решения задач предотвращения столкновений судов, основанные на теории потенциальных полей [7, 11–13]. Несмотря на то, что в большинстве публикаций $D_{кр}$ используется как расчетная характеристика сближения судов, без анализа свойств как функции псевдоуправления, для оптимизации маневров расхождения судов он может также использоваться в целевых функциях.

На основе результатов анализа специальной литературы [1, 4, 6], в современном судовождении отсутствует как таковое систематизированное описание $D_{кр}$ как функции скалярного навигационного поля в пространстве параметров движения управляемого судна. В частности, практически не рассматриваются вопросы, связанные с направлением наибольшего изменения $D_{кр}$, его локальной чувствительностью к изменению курса и / или скорости управляемого судна, а также геометрической интерпретацией этих свойств. В то же время в теории судовождения¹ хорошо разработан аппарат описания навигационных параметров на основе их градиентов для линеаризации уравнений навигационных изолиний и определения места судна методом линий положения.

¹ Кожухов В. П., Жухлин А. М., Кондрашихин В. Т. [и др.]. Математические основы судовождения: учебник для вузов. М.: Транспорт, 1993. 200 с.

Формализация $D_{кр}$, подобно традиционным навигационным параметрам, для которых сформированы представления об изолиниях параметра [14], модулях и направлениях градиентов, позволит более эффективно использовать $D_{кр}$ в задачах предотвращения столкновений и синтеза интеллектуальных алгоритмов маневрирования судов.

Целью настоящего исследования является разработка принципа формализации параметра $D_{кр}$ аналогично классическому методу описания навигационных параметров в судовождении на основе градиентного подхода. Предлагается рассматривать $D_{кр}$ как скалярное поле в пространстве параметров движения управляемого судна, а свойства анализировать на основе модуля и направления градиента, решив при этом следующие задачи:

- формализация $D_{кр}$ как функцию параметров движения управляемого судна;
- вывод аналитических выражений направления и модуля градиента $D_{кр}$;
- определение связи градиента $D_{кр}$ с изолиниями $T_{кр}$;
- обоснование применения градиентного подхода к задачам предотвращения столкновений судов.

Полученные результаты направлены на расширение теоретического аппарата судовождения и могут быть использованы при разработке алгоритмов бортовых и береговых САПП, способов поддержки принятия решений автоматизированных систем предотвращения столкновений судов.

Методы и материалы (Methods and Materials)

Допустим, начальное взаимное положение судов задается в декартовых координатах X, Y . Тогда при положении управляемого судна в центре начальная дистанция определяется в виде

$$D_0 = \sqrt{X_0^2 + Y_0^2}, \quad (1)$$

где D_0 — дистанция до судна-цели в начальный момент времени; X_0, Y_0 — начальные координаты судна-цели.

Известно, что скорости управляемого судна V , судна-цели V_T и относительная скорость сближения V_R связаны соотношениями:

$$\vec{V}_T = \vec{V}_R + \vec{V}; \quad V_{Tx} = V_{Rx} + V_x; \quad V_{Ty} = V_{Ry} + V_y, \quad (2)$$

где V_{Tx}, V_{Ri}, V_i ($i = x, y$) — проекции векторов скорости судна-цели, относительного движения и управляемого судна на координатные оси x, y соответственно.

На основе работ [15, 16] $D_{кр}$ и $T_{кр}$ можно определить следующим образом:

$$D_{кр} = \sqrt{D_0^2 - \frac{(X_0 V_{Rx} + Y_0 V_{Ry})^2}{V_R^2}}; \quad T_{кр} = -\frac{X_0 V_{Rx} + Y_0 V_{Ry}}{V_R^2}. \quad (3)$$

В соответствии с формулой (1) в учебнике² навигационные параметры традиционно рассматриваются как параметры, образующие скалярное поле, а скорость их изменения характеризуется векторной величиной, называемой *градиентом*, который всегда направлен по нормали к функции в заданной точке в сторону увеличения значений параметра.

Определить компоненты градиента параметра $D_{кр}$ — его модуль и направление относительно меридиана как функции параметров движения управляемого судна возможно посредством взятия частных производных:

$$g = \sqrt{\left(\frac{\partial D_{кр}}{\partial V_x}\right)^2 + \left(\frac{\partial D_{кр}}{\partial V_y}\right)^2}; \quad \tan \tau = \frac{\frac{\partial D_{кр}}{\partial V_x}}{\frac{\partial D_{кр}}{\partial V_y}}. \quad (4)$$

где g, τ — модуль и направление градиента параметра $D_{кр}$ соответственно.

² Кожухов В. П., Жухлин А. М., Кондрашихин В. Т. [и др.]. Математические основы судовождения: учебник для вузов. М.: Транспорт, 1993. С. 2.

Для определения частных производных параметра $D_{кр}$ по компонентам вектора скорости управляемого судна используем выражение (3):

$$\frac{\partial D_{кр}}{\partial V_x} = -\frac{1}{2D_{кр}} \frac{\partial \left(\frac{(X_0 V_{Rx} + Y_0 V_{Ry})^2}{V_R^2} \right)}{\partial V_x}; \quad \frac{\partial D_{кр}}{\partial V_y} = -\frac{1}{2D_{кр}} \frac{\partial \left(\frac{(X_0 V_{Rx} + Y_0 V_{Ry})^2}{V_R^2} \right)}{\partial V_y}. \quad (5)$$

После взятия частных производных через начальные координаты судна-цели и компоненты вектора относительной скорости сближения судов получим следующие выражения:

$$\frac{\partial D_{кр}}{\partial V_x} = \frac{(X_0 V_R^2 - V_{Rx} (X_0 V_{Rx} + Y_0 V_{Ry})) (X_0 V_{Rx} + Y_0 V_{Ry})}{D_{кр} V_R^4}; \quad (6)$$

$$\frac{\partial D_{кр}}{\partial V_y} = \frac{(Y_0 V_R^2 - V_{Ry} (X_0 V_{Rx} + Y_0 V_{Ry})) (X_0 V_{Rx} + Y_0 V_{Ry})}{D_{кр} V_R^4}. \quad (7)$$

Тогда подставив выражения (6), (7) в (4) и выполнив упрощения и преобразования, получим искомые выражения для модуля и направления градиента $D_{кр}$:

$$g = \sqrt{\frac{(X_0 V_{Rx} + Y_0 V_{Ry})^2}{V_R^4}} = \left| \frac{X_0 V_{Rx} + Y_0 V_{Ry}}{V_R^2} \right| = |T_{кр}|; \quad (8)$$

$$\tan \tau = -\frac{V_{Ry}}{V_{Rx}}. \quad (9)$$

Учитывая, что угловые коэффициенты прямых-изолиний $D_{кр}$ равны угловым коэффициентам наклона к меридиану соответствующих линий относительного движения, запишем

$$\tan(\angle \text{ЛОД}) = \frac{V_{Rx}}{V_{Ry}}; \quad \tan(\angle \text{ЛОД}) \tan \tau = -1 \Rightarrow \vec{g} \perp \text{ЛОД}, \quad (10)$$

где ЛОД — линия относительного движения.

Тогда из выражения (10) следует перпендикулярность ЛОД направлению градиента $D_{кр}$, следовательно, оптимальное с точки зрения наискорейшего увеличения $D_{кр}$ направление изменения вектора скорости управляемого судна должно быть перпендикулярно ЛОД. Это важное геометрическое свойство позволяет без каких-либо вычислений быстро оценить практическую целесообразность возможного маневра.

На основе выражения (8) доказывается следующее основное утверждение: модуль градиента функции $D_{кр}$ по изменениям вектора скорости управляемого судна равен абсолютному значению $T_{кр}$. Таким образом, получается важная связь параметров $D_{кр}$ и $T_{кр}$ через градиент в явном виде

$$|\nabla D_{кр}| = |T_{кр}|, \quad (11)$$

где ∇ — оператор градиента.

Иными словами, маневр тем эффективнее, чем дальше по времени момент кратчайшего сближения.

Как правило, в практическом судовождении при планировании маневра стремятся максимизировать скорость увеличения дистанции кратчайшего сближения $D_{кр}$ и поскольку градиент показывает направление изменений курса и скорости управляемого судна для максимально быстрого увеличения этого параметра, а модуль градиента характеризует эффективность маневра, то, чем меньше $T_{кр}$, тем активнее должен быть маневр.

Параметр $T_{кр}$ является простой количественной оценкой чувствительности $D_{кр}$ к изменениям вектора скорости управляемого судна. Градиентный подход к задаче предотвращения столкновений

судов объединяет геометрическую составляющую процесса и время сближения, что позволяет интуитивно и быстро, но при этом строго формализовано оценивать навигационную обстановку.

Уравнения линий равных значений параметров $D_{кр}$ и $T_{кр}$ (изолиний $D_{кр}$ и $T_{кр}$) на основе [15, 16] определяются в следующем виде:

$$V_y = \frac{X_0 Y_0 \pm D_{кр} \sqrt{D_0^2 - D_{кр}^2}}{X_0^2 - D_{кр}^2} (V_x - V_{Tx}) + V_{Ty}; \quad (12)$$

$$\left(V_x - \frac{X_0 + 2V_{Tx}T_{кр}}{2T_{кр}} \right)^2 + \left(V_y - \frac{Y_0 + 2V_{Ty}T_{кр}}{2T_{кр}} \right)^2 = \left(\frac{D_0}{2T_{кр}} \right)^2. \quad (13)$$

Таким образом, градиентный подход объединяет геометрические и временные характеристики сближения судов в целостную оценку маневра. Сочетание геометрии и времени образует единый инструмент анализа навигационной обстановки, что особенно важно в сложных ситуациях сближения нескольких судов.

Результаты (Results)

Для оценки корректности полученных результатов: зависимости $D_{кр}$ от компонент вектора скорости управляемого судна V , выполнено компьютерное моделирование. На рис. 1, а представлена трехмерная поверхность функции $D_{кр}(V_x, V_y)$ в формулах (3) при заданных параметрах начальной позиции, курса и скорости судна-цели. Полученная поверхность имеет выраженные области значений $D_{кр}$, соответствующих опасным псевдоуправлениям, ведущим к опасным сближениям с судном-целью. Если на поверхности $D_{кр}$ провести окружность $V = \text{const} = 10$ уз, соответствующую маневрам при постоянной скорости управляемого судна, то она описывает зависимость $D_{кр}$ исключительно от маневра курсом управляемого судна. Поскольку поверхность $D_{кр}$ является гладкой, это позволяет применять методы градиентного анализа, а также выделить опасные и безопасные области в пространстве курса и скорости управляемого судна.

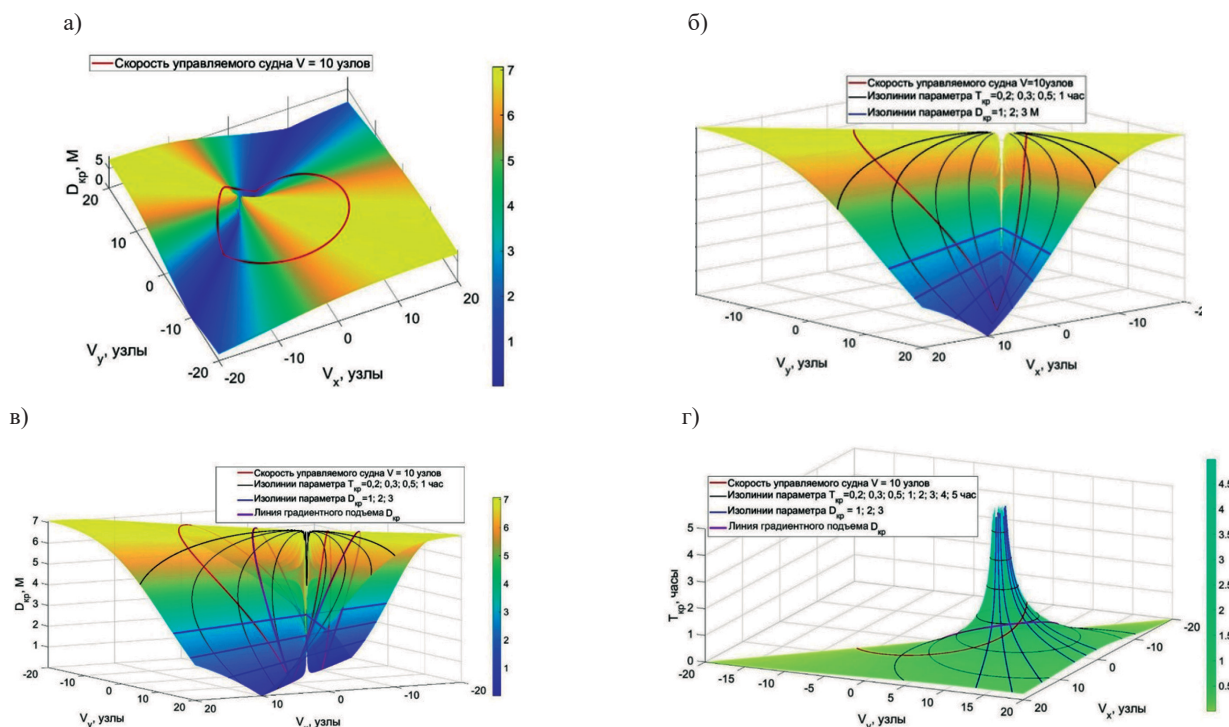


Рис. 1. Трехмерные поверхности функций:

- а — $D_{кр}(V_x, V_y)$; $X_0 = 5$ М, $Y_0 = 5$ М; $V_{Tx} = -5$ уз; $V_{Ty} = 5$ уз;
 б — $D_{кр}(V_x, V_y)$ и изолинии параметров $D_{кр}$ и $T_{кр}$ в полупространстве $V_y > -V_x$;
 в — $D_{кр}(V_x, V_y)$ с линией градиентного подъема $D_{кр}$; г — $T_{кр}(V_x, V_y)$

Для наглядности на рис. 1, б в другом ракурсе показана половина поверхности $D_{кр}$, на которой проведены изолинии параметров $D_{кр}$ и $T_{кр}$ — уравнения (12), (13). Каждая изолиния $T_{кр}$ соответствует окружности в пространстве компонент вектора скорости управляемого судна V_x, V_y , определяющей маневры, для которых кратчайшее сближение с судном-целью наступает через заданный промежуток времени. Изолинии параметров $D_{кр}$ (линии уровней на поверхности $D_{кр}$) представляют собой прямые в пространстве компонент вектора скорости управляемого судна V_x, V_y .

На рис. 1, в изображена поверхность функции $D_{кр}(V_x, V_y)$ с линией градиентного подъема (наибольшего возрастания) функции $D_{кр}(V_x, V_y)$ для начальных значений компонент вектора скорости управляемого судна $V_x = 0$ уз, $V_y = 10$ уз. В плоскости компонент вектора скорости управляемого судна линия градиентного подъема представляет собой окружность с центром в точке $(-5; 5)$ с радиусом 7,07 уз для рассматриваемого случая. В каждой точке этой окружности градиент параметра $D_{кр}$ направлен по касательной (перпендикулярно изолиниям $D_{кр}$) в сторону увеличения значений параметра $D_{кр}$.

На рис. 1, г представлены результаты численного моделирования поверхности $T_{кр}(V_x, V_y)$ при тех же параметрах: начальной позиции, курса и скорости судна-цели при $T_{кр} > 0$. Изолинии параметра $T_{кр}$ (линии уровней на поверхности $T_{кр}$) представляют собой окружности в пространстве компонент вектора скорости управляемого судна V_x, V_y .

На рис. 2 показана тепловая карта функции $T_{кр}(V_x, V_y)$ при тех же начальных координатах и параметрах движения судна-цели, для цветовой визуализации использован диапазон $T_{кр} = 1-60$ мин. Черные стрелки показывают поле градиентов параметра $D_{кр}$, красным цветом выделены стрелки вдоль окружности при постоянной скорости управляемого судна $V = 10$ уз, соответствующей маневру курсом.

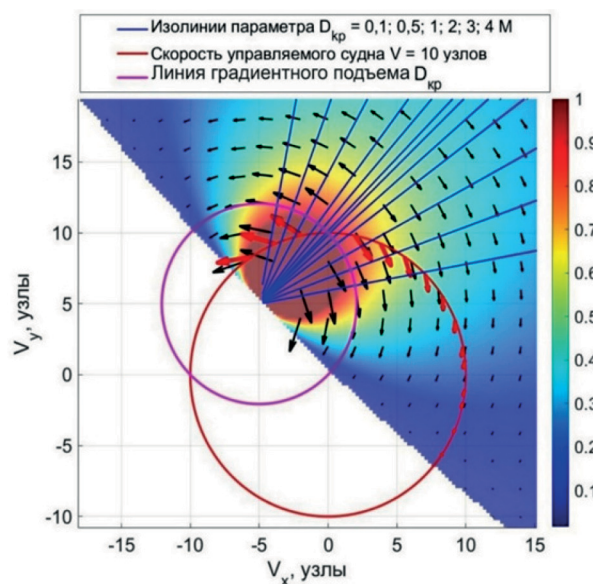


Рис. 2. Тепловая карта параметра $T_{кр}$ и поле градиентов параметра $D_{кр}$

Таким образом, визуализация поверхностей функций $D_{кр}$ и $T_{кр}$, поля градиентов $D_{кр}$ на тепловой карте $T_{кр}$, изолиний соответствующих параметров и линии градиентного подъема обеспечивает наглядное и универсальное описание возможных маневров управляемого судна, позволяя количественно оценивать их эффективность.

Обсуждение (Discussion)

Построенные поверхности $D_{кр}(V_x, V_y)$ и $T_{кр}(V_x, V_y)$ наглядно показывают, что опасное сближение определяется совместным распределением параметров $D_{кр}$ и $T_{кр}$ в пространстве курса

и скорости управляемого судна. Поверхность $D_{кр}(V_x, V_y)$ имеет выраженные области минимума, соответствующие псевдоуправлениям, при которых прогнозируется опасное сближение. В то же время поверхность $T_{кр}(V_x, V_y)$ показывает, что эти области могут соответствовать различным значениям $T_{кр}$, что подтверждает опыт практического судовождения — малое значение $D_{кр}$ само по себе не означает опасность столкновения, например, если значение $T_{кр}$ достаточно велико. Полученные поля параметров подтверждают необходимость совместного использования параметров $D_{кр}$ и $T_{кр}$, что согласуется с современным подходом планирования расхождения судов на основе информации от системы автоматической радиолокационной прокладки (САРП) [17].

Изолинии $D_{кр}$ формируют допустимые и недопустимые области псевдоуправлений, что хорошо согласуется с идеей ЗНБ [18–21]. Изолинии $T_{кр}$ задают горизонты планирования, которые дополняют области $D_{кр}$ временными характеристиками, что соответствует регламентированию требований к минимально допустимым значениям $D_{кр}$ и $T_{кр}$ в практике современного судовождения. Оценивать опасность сближения при этом удобно именно в области допустимых значений курса и скорости управляемого судна, а не отдельными скалярными параметрами $D_{кр}$ и $T_{кр}$.

Одним из ключевых результатов является визуализация поля градиента $D_{кр}$ и линии градиентного подъема, показывающие траекторию в пространстве компонент вектора скорости управляемого судна, вдоль которой значение $D_{кр}$ возрастает наиболее быстро, что фактически определяет наиболее эффективный маневр. Подобный подход близок к вариационным и оптимизационным методам [6].

В отличие от установленных Международных правил предупреждения столкновений судов в море 1972 года (МППСС-72) и эвристических практик маневрирования судов градиентный подход определяет непрерывное поле допустимых псевдоуправлений как формальную основу для автоматизированного выбора маневра, а модуль градиента $D_{кр}$ как количественную оценку эффективности маневра.

В настоящей работе предлагается вместо скалярных значений $D_{кр}$ и $T_{кр}$ рассматривать геометрию поля параметров $D_{кр}$ и $T_{кр}$, что открывает возможность развивать применение методов теории поля в задачах управления судном, например, таких как метод искусственного потенциального поля [5, 7, 10, 12], но при этом $D_{кр}$ и $T_{кр}$ принимают строгий навигационный смысл. Следует отметить, что полученные результаты справедливы при допущении о постоянных курсе и скорости судна-цели и не учитывают маневренные ограничения управляемого судна.

Предложенный вариант визуализации и градиентный подход позволят расширить традиционные методы оценки опасности сближения судов по параметрам $D_{кр}$ и $T_{кр}$ и могут быть использованы в автоматизированных навигационных комплексах как теоретическая основа выбора эффективного маневра. Следует особо отметить, что в силу доказанного утверждения (11) равенство модуля градиента $D_{кр}$ величине $T_{кр}$ означает, что изолинии параметра $T_{кр}$ — суть модуль градиента $D_{кр}$. Так как градиент $D_{кр}$ характеризует локальную чувствительность $D_{кр}$ к изменениям курса и/или скорости управляемого судна, модуль градиента $D_{кр}$ можно интерпретировать как *показатель эффективности маневра*, и следовательно, изолинии $T_{кр}$ играют роль границ целесообразности исполнения маневра. На этой основе можно сформулировать следующий принцип, связывающий геометрию поля $D_{кр}$ с практикой судовождения: маневр следует выполнять в пределах области (ограждающая изолиния $T_{кр}$) с достаточной величиной модуля градиента $D_{кр}$ — *зоны эффективного маневра*. При этом изолинии $T_{кр}$ могут быть интерпретированы как линии равной эффективности маневра, а величина $|\nabla D_{кр}|$ характеризует локальную чувствительность параметра безопасности $D_{кр}$ к изменению псевдоуправления. В зонах с малым $|\nabla D_{кр}|$ маневр теряет практический смысл. Показанная эквивалентность (11) позволяет использовать изолинии $T_{кр}$ как естественные границы эффективности маневра.

Другим практическим преимуществом изолиний $T_{кр}$ является замкнутость, поэтому ограждающая изолиния $T_{кр}$ — окружность в плоскости V_x, V_y — естественным образом делит плоскость V_x, V_y на внутреннюю область эффективного маневра и внешнюю область неэффективного маневра. Кроме того, окружности удобно вычислять аналитически, отображать на экране навигационной системы и оценивать безопасность текущего псевдоуправления.

Таким образом, параметр $T_{кр}$ является удобным инструментом для оценки эффективности маневра, а изолинии $T_{кр}$ можно назвать *линиями равной эффективности маневра*. Поле параметра $T_{кр}$ задает компактную и наглядную структуру, удобную для формализации понятий *хорошей морской практики* и требований МППСС-72.

Заключение (Conclusion)

В настоящем исследовании предложен и проанализирован геометрический подход к оценке опасности столкновения судов на основе полей параметров кратчайшего сближения. Показано, что параметры $D_{кр}$ и $T_{кр}$ целесообразно рассматривать не как отдельные скалярные оценки опасности столкновения судов, а как связанные поля в плоскости псевдоуправлений. Совместное отображение поверхностей, изолиний и градиентов позволяет выявить структуру допустимых и недопустимых областей псевдоуправлений и интерпретировать безопасность маневра расхождения.

Ключевым результатом является введение и визуализация линии градиентного подъема функции $D_{кр}$, которая задает формальное направление эффективного маневра расхождения, что создает основу для применения методов оптимального управления и теории поля в задачах предотвращения столкновений судов.

Полученные теоретические результаты и компьютерное моделирование подтверждают, что изолинии $D_{кр}$ и $T_{кр}$ могут рассматриваться как обобщение практических требований к расхождению судов. Их совместное использование обеспечивает более полное и непротиворечивое описание навигационной ситуации по сравнению с традиционными оценками опасности столкновения — постоянство пеленга при уменьшении дистанции, скалярные оценки $D_{кр}$ и $T_{кр}$.

На основе выполненных исследований можно сформулировать следующие выводы:

1. Параметры $D_{кр}$ и $T_{кр}$ образуют согласованную геометрическую структуру в плоскости псевдоуправлений.
2. Допустимые и недопустимые маневры естественным образом выделяются как области, ограниченные соответствующими изолиниями $D_{кр}$ и $T_{кр}$.
3. Градиент параметра $D_{кр}$ определяет направление наиболее эффективного маневра расхождения, а его модуль служит мерой эффективности маневра и в рамках полученной модели совпадает по величине с параметром $T_{кр}$.
4. Представленный подход может быть использован как теоретическая основа для систем поддержки принятия решений и автономного судовождения.

По результатам исследования рекомендуется использовать совместно поля параметров $D_{кр}$ и $T_{кр}$ при анализе навигационной обстановки, рассматривать маневр расхождения в области допустимых псевдоуправлений как обобщение и формализацию эвристических практик судовождения, а также применять градиентный подход при разработке алгоритмов автономного судовождения.

В дальнейших исследованиях представляется целесообразным рассмотреть модель применительно к случаю оценки ситуации расхождения для нескольких судов-целей и для условий плотного судопотока, а также с учетом маневренных ограничений управляемого судна; интегрировать предложенный подход с установленными требованиями МППСС-72; формализовать понятия *хорошей морской практики*; сформировать и протестировать алгоритмы градиентного подхода в системах автономного судовождения и тренажерных комплексах.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Смоленцев С. В. Взаимодействие агентов в задаче расхождения безэкипажных судов / С. В. Смоленцев // Управление в морских системах (УМС-2022): 15-я Мультиконференция по проблемам управления: материалы конференции, Санкт-Петербург, 04–06 октября 2022 года. — Санкт-Петербург: Концерн «Центральный научно-исследовательский институт “Электроприбор”», 2022. — С. 36–39. — EDN NVWVKA.
2. Lee M. Ch. A collision avoidance method for multi-ship encounter situations / M. Ch. Lee, Ch. Yu. Nieh, H. Ch. Kuo, Ju. Ch. Huang // Journal of Marine Science and Technology. — 2020. — Vol. 25. — Is. 3. — С. 925–942. DOI: 10.1007/s00773-019-00691-8. — EDN DDELWC.

3. Liu W. COLREGS-based collision avoidance algorithm for unmanned surface vehicles using modified artificial potential fields / W. Liu, K. Qiu, X. Yang, R. Wang, Z. Xiang, Y. Wang, W. Xu // *Physical Communication*. — 2023. — Vol. 57. — Pp. 101980. DOI: 10.1016/j.phycom.2022.101980. — EDN DQALBF.
4. Lazarowska A. Review of Collision Avoidance and Path Planning Methods for Ships Utilizing Radar Remote Sensing / A. Lazarowska // *Remote Sensing*. — 2021. — Vol. 13. — Is. 16. DOI: 10.3390/rs13163265. — EDN YQZLAP.
5. Gao P. Research on ship collision avoidance path planning based on modified potential field ant colony algorithm / P. Gao, L. Zhou, X. Zhao, B. Shao // *Ocean & Coastal Management*. — 2023. — Vol. 235. — Pp. 106482. DOI: 10.1016/j.ocecoaman.2023.106482. — EDN DUJNWQ.
6. Lyu H. Ship Autonomous Collision-Avoidance Strategies — A Comprehensive Review / H. Lyu, Z. Hao, J. Li, G. Li, X. Sun, G. Zhang, Y. Yin, Y. Zhao, L. Zhang // *Journal of Marine Science and Engineering*. — 2023. — Vol. 11. — Is. 4. DOI: 10.3390/jmse11040830. — EDN DWEHXM.
7. Zhu Z. An Efficient Ship Automatic Collision Avoidance Method Based on Modified Artificial Potential Field / Z. Zhu, H. Lyu, J. Zhang, Y. Yin // *Journal of Marine Science and Engineering*. — 2022. — Vol. 10. — Is. 1. DOI: 10.3390/jmse10010003. — EDN PVELTI.
8. Li M. Comparison between the collision avoidance decision-making in theoretical research and navigation practices / M. Li, J. Mou, L. Chen, Y. Huang, P. Chen // *Ocean Engineering*. — 2021. — Vol. 228. — Pp. 108881. DOI: 10.1016/j.oceaneng.2021.108881. — EDN IJRYGI.
9. Wen X. Ship Automatic Collision Avoidance by Altering Course Based on Ship Dynamic Domain / X. Wen, H. Jiangqiang, Y. Jianchuan, L. Ke // *2016 IEEE Trustcom/BigDataSE/ISPA*. — 2016. — Pp. 2024–2030. DOI: 10.1109/TrustCom.2016.0309.
10. Zhu Z. Automatic collision avoidance algorithm based on route-plan-guided artificial potential field method / Z. Zhu, Y. Yin, H. Lyu // *Ocean Engineering*. — 2023. — Vol. 271. — Pp. 113737. DOI: 10.1016/j.oceaneng.2023.113737. — EDN VFYSCA.
11. Zhu Z. A practical environment potential field modelling method for complex geometric objects / Z. Zhu, H. Lyu, J. Zhang, Y. Yin, X. Fan // *Journal of Navigation*. — 2023. — Vol. 76. — Is. 1. — Pp. 38–61. DOI: 10.1017/S0373463322000455. — EDN MVQGEU.
12. Xu X. Dynamic Collision Avoidance Algorithm for Unmanned Surface Vehicles via Layered Artificial Potential Field with Collision Cone / X. Xu, W. Pan, Y. Huang, W. Zhang // *Journal of Navigation*. — 2020. — Vol. 73. — Is. 6. — Pp. 1306–1325. DOI: 10.1017/S0373463320000284. — EDN HGZSND.
13. Gan L. Ship path planning based on safety potential field in inland rivers / L. Gan, Z. Yan, L. Zhang, K. Liu, Y. Zheng, C. Zhou, Y. Shu // *Ocean Engineering*. — 2022. — Vol. 260. — Pp. 111928. DOI: 10.1016/j.oceaneng.2022.111928. — EDN JVRGDK.
14. Васьков А. С. Автономное судовождение по изолиниям навигационных параметров / А. С. Васьков, А. А. Мироненко // XIV Всероссийское совещание по проблемам управления: сборник научных трудов, Москва, 17–20 июня 2024 года. — Москва: Институт проблем управления им. В. А. Трапезникова РАН, 2024. — С. 1493–1497. — EDN NWUTUT.
15. Lenart A. S. Analysis of Collision Threat Parameters and Criteria / A. S. Lenart // *Journal of Navigation*. — 2015. — Vol. 68. — Is. 5. — Pp. 887–896. DOI: 10.1017/S0373463315000223.
16. Lenart A. S. Manoeuvring to required approach parameters-CPA distance and time / A. S. Lenart // *Annual of Navigation*. — 1999. — Is. 1/99. — Pp. 99–108.
17. Lisowski J. Comparison of Computational Intelligence Methods Based on Fuzzy Sets and Game Theory in the Synthesis of Safe Ship Control Based on Information from a Radar ARPA System / J. Lisowski, M. Mohamed-Seghir // *Remote Sensing*. — 2019. — Vol. 11. — Is. 1. DOI: 10.3390/rs11010082.
18. Васьков А. С. Взаимосвязь зон навигационной безопасности судна / А. С. Васьков, В. А. Васьков, А. А. Мироненко // *Вестник государственного морского университета имени адмирала Ф. Ф. Ушакова*. — 2013. — Is. 2(3). — Pp. 18–21. — EDN SCCEPX.
19. Васьков А. С. Методы управления движением судна и конфигурацией зоны навигационной безопасности / А. С. Васьков. — Новороссийск: НГМА, 1997. — 248 с.
20. Васьков А. С. Обобщение концепций и управление зоной навигационной безопасности судна / А. С. Васьков, А. А. Мироненко // *Морские интеллектуальные технологии*. — 2019. — № 1–2(43). — С. 112–120. — EDN RPHAY.
21. Васьков А. С. Способы представления зоны навигационной безопасности судна / А. С. Васьков, М. А. Гарашенко // *Эксплуатация морского транспорта*. — 2017. — № 3(84). — С. 38–44. — EDN ZXQXVL.

REFERENCES

1. Smolentsev, S. V. "Interaction of agents in the problem of collision avoidance of unmanned vessels." *Upravlenie v morskikh sistemakh (UMS-2022): 15-ya MUL'TIKONFERENTsIYa PO PROBLEMAM UPRAVLENIYa. Materialy konferentsii, Sankt-Peterburg, 04–06 oktyabrya 2022 goda*. Sankt-Peterburg: "Kontsern "Tsentral'nyy nauchno-issledovatel'skiy institut "Elektropribor", 2022: 36–39.
2. Lee, M. Ch., Ch. Yu. Nieh, H. Ch. Kuo and Ju. Ch. Huang. "A collision avoidance method for multi-ship encounter situations." *Journal of Marine Science and Technology* 25.3 (2020): 925–942. DOI: 10.1007/s00773-019-00691-8.
3. Liu, W., W. Xu et al. "COLREGS-based collision avoidance algorithm for unmanned surface vehicles using modified artificial potential fields." *Physical Communication* 57 (2023): 101980. DOI: 10.1016/j.phycom.2022.101980.
4. Lazarowska, A. "Review of Collision Avoidance and Path Planning Methods for Ships Utilizing Radar Remote Sensing." *Remote Sensing* 13.16 (2021). DOI: 10.3390/rs13163265.
5. Gao, P., L. Zhou, X. Zhao and B. Shao. "Research on ship collision avoidance path planning based on modified potential field ant colony algorithm." *Ocean & Coastal Management* 235 (2023): 106482. DOI: 10.1016/j.ocecoaman.2023.106482.
6. Lyu, H., L. Zhang et al. "Ship Autonomous Collision-Avoidance Strategies — A Comprehensive Review." *Journal of Marine Science and Engineering* 11.4 (2023). DOI: 10.3390/jmse11040830.
7. Zhu, Z., H. Lyu, J. Zhang and Y. Yin. "An Efficient Ship Automatic Collision Avoidance Method Based on Modified Artificial Potential Field." *Journal of Marine Science and Engineering* 10.1 (2022). DOI: 10.3390/jmse10010003.
8. Li, M., P. Chen et al. "Comparison between the collision avoidance decision-making in theoretical research and navigation practices." *Ocean Engineering* 228 (2021): 108881. DOI: 10.1016/j.oceaneng.2021.108881.
9. Wen, X., H. Jiangqiang, Y. Jianchuan and L. Ke. "Ship Automatic Collision Avoidance by Altering Course Based on Ship Dynamic Domain." *2016 IEEE Trustcom/BigDataSE/ISPA, 2016: 2024–2030*. DOI: 10.1109/TrustCom.2016.0309.
10. Zhu, Z., Y. Yin and H. Lyu. "Automatic collision avoidance algorithm based on route-plan-guided artificial potential field method." *Ocean Engineering* 271 (2023): 113737. DOI: 10.1016/j.oceaneng.2023.113737.
11. Zhu, Z., X. Fan et al. "A practical environment potential field modelling method for complex geometric objects." *Journal of Navigation* 76.1 (2023): 38–61. DOI: 10.1017/S0373463322000455.
12. Xu, X., W. Pan, Y. Huang and W. Zhang. "Dynamic Collision Avoidance Algorithm for Unmanned Surface Vehicles via Layered Artificial Potential Field with Collision Cone." *Journal of Navigation* 73.6 (2020): 1306–1325. DOI: 10.1017/S0373463320000284.
13. Gan, L., Y. Shu et al. "Ship path planning based on safety potential field in inland rivers." *Ocean Engineering* 260 (2022): 111928. DOI: 10.1016/j.oceaneng.2022.111928.
14. Vas'kov, A. S. and A. A. Mironenko. "Avtonomnoe sudovozhdenie po izoliniyam navigatsionnykh parametrov." *XIV Vserossiyskoe soveshanie po problemam upravleniya: sbornik nauchnykh trudov, Moskva, 17–20 iyunya 2024 goda*. Moskva: Institut problem upravleniya im. V. A. Trapeznikova RAN, 2024: 1493–1497.
15. Lenart, A. S. "Analysis of Collision Threat Parameters and Criteria." *Journal of Navigation* 68.5 (2015): 887–896. DOI: 10.1017/S0373463315000223.
16. Lenart, A. S. "Manoeuvring to required approach parameters-CPA distance and time." *Annual of Navigation* 1/99 (1999): 99–108.
17. Lisowski, J. and M. Mohamed-Seghir. "Comparison of Computational Intelligence Methods Based on Fuzzy Sets and Game Theory in the Synthesis of Safe Ship Control Based on Information from a Radar ARPA System." *Remote Sensing* 11.1 (2019). DOI: 10.3390/rs11010082.
18. Vas'kov, A. S., V. A. Vas'kov and A. A. Mironenko. "Ships navigation domain relationship." *Vestnik gosudarstvennogo morskogo universiteta imeni admirala F. F. Ushakova* 2(3) (2013): 18–21.
19. Vas'kov, A. S. Vas'kov, A. S. *Metody upravleniya dvizheniem sudna i konfiguratsiey zony navigatsionnoy bezopasnosti*. Novorossiysk: NGMA, 1997: 248.
20. Vas'kov, A. S. and A. A. Mironenko. "Generalization of the ship's domain concepts and its control." *Morskie intellektual'nye tekhnologii* 1–2(43) (2019): 112–120.
21. Vas'kov, A. S. and M. A. Garaschenko. "The methods for conception of ship's domain." *Ekspluatatsiya morskogo transporta* 3(84) (2017): 38–44.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Жук Александр Сергеевич —

кандидат технических наук, старший научный сотрудник научно-исследовательского центра развития безэкипажного судоходства, ФГБОУ ВО «ГМУ им. адм. Ф. Ф. Ушакова» 353924, Российская Федерация, г. Новороссийск, проспект Ленина, 93

e-mail: alszhuk@yandex.ru

Мироненко Александр Анатольевич —

доктор технических наук, доцент, ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова» 198035, Российская Федерация, г. Санкт-Петербург, ул. Двинская, 5/7

e-mail: alex_mironenko@mail.ru,

mironenkoaa@gumrf.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Zhuk, Alexander S. —

PhD in Technical Sciences, Senior Research Fellow of Research Center for the Development of Autonomous Shipping Admiral Ushakov Maritime State University 93 Lenin Avenue, Novorossiysk, 353924, Russian Federation

e-mail: alszhuk@yandex.ru

Mironenko, Aleksandr A. —

Grand PhD in Technical Sciences, associate professor, Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping 5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg, 198035, Russian Federation

e-mail: alex_mironenko@mail.ru,

mironenkoaa@gumrf.ru

Статья поступила в редакцию 11 декабря 2025 г.

Received: Dec. 11, 2025

BAYESIAN BELIEF NETWORKS AS A TOOL FOR ANALYZING MARITIME SAFETY TAKING INTO ACCOUNT THE HUMAN FACTOR

V. A. Loginovsky

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

The study addresses cognitive hazards, also referred to as “demons” in the work of M. Endsley, which contribute to reductions in a navigator’s situational awareness during watchkeeping duties on the ship’s bridge. Despite the widespread adoption of advanced information and communication technologies in maritime operations, accidents on transport vessels remain frequent, with human error identified as the primary cause. Such errors often result from lapses in situational awareness triggered by cognitive hazards encountered while monitoring the navigational environment. When these hazards are unrecognized, they compromise the quality of observation, reducing the navigator’s ability to perceive, comprehend, and anticipate the development of the surrounding situation over time. Cognitive hazards are difficult to identify, creating challenges for collecting sufficient data to model human mental and physical states and behavior in various, especially critical, scenarios. To address these challenges, mathematical tools that integrate statistical and expert assessments can be applied. The study proposes Bayesian belief networks to evaluate the impact of cognitive hazards on navigational incidents. This method allows direct assessment of the probability of an incident arising from emerging hazards, facilitating risk analysis, and inverse evaluation of the probabilities of causes for incidents that have already occurred. A Bayesian belief network is presented to model conditional probabilistic relationships between events linking potential cognitive hazards to the navigator’s situational awareness and the immediate causes of incidents, using a grounding scenario as an illustrative example. The network enables comprehensive analysis of how cognitive hazards propagate through decision-making on the bridge and quantifies their contribution to maritime risk, providing practical guidance for improving navigation safety and supporting further research integrating human factors into probabilistic risk assessments in ship operations.

Keywords: maritime safety, situational awareness, cognitive hazards, Bayes’ theorem, transport vessels, ship operations, decision-making, probabilistic-statistical methods, expert assessments, human factor.

For citation:

Loginovsky, Vladimir A. “Bayesian belief networks as a tool for analyzing maritime safety taking into account the human factor.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 18.1 (2026): 49–59. DOI: 10.21821/2309-5180-2026-18-1-49-59.

УДК 656.61, 551.577.53

БАЙЕСОВСКИЕ СЕТИ ДОВЕРИЯ КАК ИНСТРУМЕНТ АНАЛИЗА БЕЗОПАСНОСТИ МОРЕПЛАВАНИЯ С УЧЕТОМ ЧЕЛОВЕЧЕСКОГО ФАКТОРА

В. А. Логиновский

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

Темой исследования являются когнитивные опасности по М. Эндсли (демоны), оказывающие влияние на снижение уровней владения ситуацией судоводителем при несении ходовой навигационной вахты. Несмотря на интенсивное внедрение прогрессивных информационно-коммуникационных технологий в мореплавании аварийность на транспортных судах находится на достаточно высоком уровне. Отмечается, что основной причиной аварийности является человеческий фактор, который в большинстве случаев выражается в потере владения ситуацией судоводителем при исполнении им обязанностей по несению вахты на мостике судна. Этому способствуют когнитивные опасности, которые подстерегают судоводителя, осуществляющего наблюдение за навигационной обстановкой. Реализация этих опасностей превращает их в причины некачественного процесса наблюдения, запуская механизмы снижения уровней

владения ситуацией, что оказывает негативное влияние на восприятие окружающей навигационной обстановки, ее понимание и прогнозирование развития в некотором интервале времени. Подчеркивается, что когнитивные опасности, сопутствующие выполнению функций по несению вахты, трудно распознаются, что создает определенные сложности для сбора необходимых данных для проведения исследования по моделированию ментального и физического состояния человека, а также его поведения в различных, особенно критических ситуациях. Частичное решение проблемы может быть получено с помощью математических инструментов, способных объединять статистические и экспертные оценки для решения подобных задач. В работе предлагается использование байесовских сетей доверия для оценки влияния этих опасностей на навигационные происшествия. Представленный метод дает возможность решать прямую задачу по оценке вероятности происшествия под влиянием когнитивных опасностей, что связано с оценкой риска, а также проводить анализ обратной задачи по оценке вероятностей причин уже произошедшего происшествия. В статье рассмотрен пример байесовской сети доверия, моделирующей условные вероятностные зависимости между событиями, которые связывают потенциальные когнитивные опасности с уровнями владения ситуацией судоводителем и непосредственными причинами происшествия на примере посадки судна на грунт.

Ключевые слова: безопасность мореплавания, владение ситуацией, когнитивные опасности, теорема Байеса, транспортные суда, судовые операции, принятие решений, вероятностно-статистические методы, экспертные оценки, человеческий фактор.

Для цитирования:

Логиновский В. А. Байесовские сети доверия как инструмент анализа безопасности мореплавания с учетом человеческого фактора / В. А. Логиновский // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2026. — Т. 18. — № 1. — С. 49–59. DOI: 10.21821/2309-5180-2026-18-1-49-59. — EDN MXNIAF.

Введение (Introduction)

В современном мореплавании человеческий фактор (ЧФ) является основной причиной возникновения различных происшествий на транспортных судах. В период 2015–2024 гг. 78,8 % расследованных морских аварий и инцидентов были связаны с человеческим фактором¹ [1]. Более 70 % морских происшествий [2–3] произошли по причине потери владения ситуацией человеком, что явилось причиной, оказавшей влияние на принятие неэффективных, а порой неправильных и опасных решений, запускающих механизм возникновения ошибок в действиях человека, например во время несения ходовой навигационной вахты.

Сложность оценки и управления ЧФ в вопросах безопасности мореплавания связана прежде всего с неопределенностью, непредсказуемостью, трудностью распознавания, и, соответственно, моделирования ментального и физического состояния человека, а также его поведения в различных, особенно критических ситуациях. Это делает ЧФ постоянной и чрезвычайно актуальной тематикой для различных исследований [4–10] в сфере безопасности мореплавания, и как ни парадоксально, но в процедурах оценки риска судовых операций, которые разрабатывают компании, практически отсутствует анализ потенциальных опасностей, связанных с его влиянием. Наличие неопределенностей и недостатка информации для таких исследований стимулирует привлечение для их проведения вероятностно-статистических методов, способных привлекать и объединять как данные официальной статистики по аварийности, так и информацию, получаемую с помощью экспертных оценок. Одной из теоретических основ, которая может быть применена для анализа вероятности влияния ЧФ на безопасность мореплавания является *теорема Байеса* [11–12], используемая для конструирования причинно-следственных сетей условных вероятностей (Байесовские сети доверия (БСД))².

Целью работы является построение и исследование элементарной БСД позволяющей прогнозировать вероятность происшествия на основе влияния ЧФ, а также решать обратную задачу по расследованию вероятностей причин, ассоциирующихся с ЧФ, в результате уже возникшего

¹ EMSA, Annual Overview of Marine Casualties and Incidents 2025.pdf

<https://www.emsa.europa.eu/publications/item/5562-annual-overview-of-marine-casualties-and-incidents-2025.html>.

² БСД — это вероятностная графическая модель, которая использует ориентированный ациклический граф для представления вероятностных отношений между входящими в нее переменными.

происшествия. Для осуществления цели разработана структура БСД, связывающая когнитивные опасности с уровнями владения ситуацией судоводителем при несении навигационной вахты.

Методы и материалы (Methods and Materials)

В данной статье для конструирования БСД по расследованию навигационного происшествия был использован классический подход деления процесса владения ситуацией на три уровня [13] и классификация когнитивных опасностей, представленная в работе [14]. В процессе моделирования использовались также статистические данные из статьи [15]. Отсутствие некоторых данных для включения в таблицы условных вероятностей БСД компенсировано экспертными оценками.

Владение ситуацией. Владение ситуацией подразумевает способность человека воспринимать и понимать окружающую среду, распознавать выявленные в процессе предварительной оценки риска, а также текущие потенциальные опасности, которые сопутствуют выполнению судовой операции и прогнозировать развитие ситуации и воздействие опасностей на процесс ее выполнения.

Классически процесс владения ситуацией (Situational Awareness, SA) делится на три последовательных уровня:

1-й уровень — SA1 — восприятие, обнаружение, идентификация информационных источников, включая распознавание выявленных при оценке риска и вновь возникающих опасностей;

2-й уровень — SA2 — понимание смысла и важности воспринятой информации, а также ее комбинирование, интерпретация и запоминание;

3-й уровень — SA3 — прогнозирование развития ситуации и будущих событий, включая динамику развития опасностей в течение некоторого интервала времени.

Эффективное владение ситуацией требует от моряков наличия профессионального опыта, должной квалификации, постоянного наблюдения за окружающей обстановкой и адекватного восприятия зрительной, слуховой и тактильной поступающей информации на рабочем месте, ее правильного понимания. Корректное прогнозирование развития ситуации является основой для принятия текущих решений и выполнения необходимых, зачастую мгновенных действий для минимизации влияния возникающих опасностей, препятствующих достижению конкретных целей.

Предварительная, основанная на априорных данных, оценка риска, существенно помогает сориентироваться относительно потенциальных опасностей, сопутствующих выполнению судовой операции непосредственно во время производства работ. Следует обратить внимание на то, что если ключевым этапом в оценке риска является предварительное *определение потенциальных опасностей* в предстоящей судовой операции, то владение ситуацией предполагает *распознавание этих и новых опасностей* в процессе выполнения работ.

Ментальная модель владения ситуацией формируется у судоводителя на основе поставленной цели и осознанного профессионального наблюдения за окружающей судно обстановкой *здесь и сейчас* (например, при несении ходовой навигационной вахты на мостике транспортного судна).

Опасности. В работе [16] выделены восемь типов когнитивных опасностей, реализация которых способствует снижению уровней владения ситуацией. Они имеют свойства *потенциальных опасностей (hazards)*, т. е. представляющих *угрозу* для когнитивных процессов владения ситуацией на определенных уровнях.

Приведем описание и примеры этих опасностей:

H_1 — *тунелирование внимания* — концентрация внимания на одном источнике информации и игнорирование всего остального. Например, вахтенный помощник, концентрируя внимание на показаниях приемника ГНСС³, не замечает тревожной сигнализации САРП⁴ о приближающемся судне.

H_2 — *информационная перегрузка* — опасность, которая мешает выделить критически важные сигналы. Например, при следовании в районе интенсивного движения в темное время суток при большом количестве навигационных огней судоводитель не может выделить наиболее опасное судно ни на экране РЛС, ни визуально.

³ ГНСС — глобальная навигационная спутниковая система.

⁴ САРП — средство автоматической радиолокационной прокладки.

H_3 — *ограничение рабочей памяти человека* — неспособность удержать в памяти ключевые данные для анализа ситуации. Например, судоводитель забывает о текущей осадке судна при расчете маневра в узкозтии, что ведет к посадке на мель.

H_4 — *влияние стрессоров* (усталость, тревога, перегрузка и т. д.) — опасность, которая приводит к физическому / эмоциональному истощению, что искажает восприятие текущей ситуации и понимание логики ее развития. Например, судоводитель пропускает поворот из-за усталости, причиной которой является несоблюдение режима труда и отдыха, регламентированного разд. А-VIII/1 Кодекса ПДНВ.

H_5 — *ошибка ментальной модели* — опасность, которая относится к некорректным шаблонам мышления, что ведет к неверным выводам и действиям. Например, уверенность в высокой точности координат, полученных приемником ГНСС, даже при нахождении судна в районе высоких киберрисков.

H_6 — *неадекватная значимость данных* — это придание избыточного внимания данным, не относящимся к решению конкретной задачи. Например, придание большей значимости сохранению запланированного курса и скорости своего судна, чем возникшей необходимости выполнить маневр и решать задачу предупреждения столкновения с встречным судном.

H_7 — *усложнение процессов* — опасность возникает в результате накопления избыточных бюрократических процедур на мостике судна, что затрудняет выполнение основных функций по несению вахты и снижает уровень безопасности. Например, выполнение проверок работоспособности приборов и заполнение различных чек-листов, особенно в стесненных районах и при ограниченной видимости во время заступления на ходовую вахту.

H_8 — *синдром «Вне контура управления»* — состояние, при котором судоводитель теряет владение ситуацией из-за привыкания к автоматизированному решению задач, что снижает его способность быстро реагировать на нештатные ситуации. Например, затруднения, возникающие при необходимости классического решения задачи расхождения судов при отказе САПП в критической ситуации.

Влияние когнитивных опасностей на уровни владения ситуацией. Эти опасности при реализации становятся причинами, повышающими вероятность возникновения потенциально-опасных ситуаций (*Near Miss Incidents*) и реальных происшествий. Влияние опасностей H_1 – H_8 на уровни владения ситуацией SA1–SA3 продемонстрировано на рис. 1, откуда видно, что пять из них связаны с уровнем SA1 — восприятие информации, который является основным для достижения остальных уровней SA2 и SA3.

Некоторые опасности оказывают комплексное воздействие на уровни владения ситуацией. Так, H_2 влияет на SA1 и SA2, H_4 и H_7 — на SA1, SA2 и SA3, H_5 — на SA2 и SA3. Влияние этих опасностей в зависимости от физического и ментального состояния человека может быть различным. В предлагаемой на рис. 2 причинно-следственной модели, построенной в формате БСД и способной оценить их влияние на уровни владения ситуацией (например, при несении ходовой навигационной вахты судоводителем), используются условные вероятности, связывающие опасности, представленные на рис. 1, с уровнями владения ситуацией.

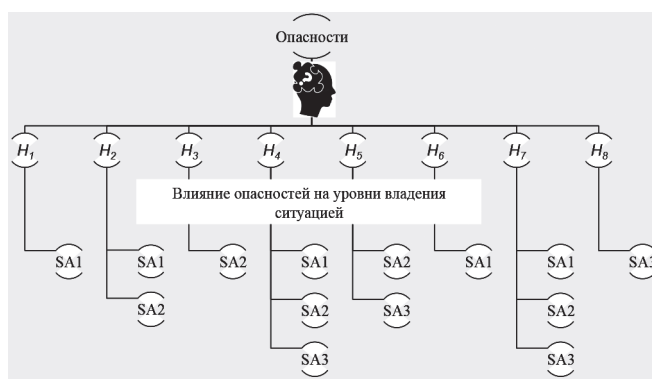


Рис. 1. Влияние когнитивных опасностей на снижение уровней владения ситуацией

При реализации опасностей обновление вероятностей в БСД описывается фундаментальной теоремой (формулой) Байеса.

Условная вероятность и теорема Байеса. Условная вероятность является ключевым элементом БСД. Она связывает вероятность наступления одного события при условии, что другое событие уже произошло и дает возможность оценивать вероятностные зависимости, представленные на рис. 1, т. е. оценивать апостериорные вероятности причин происшествия. Это дает возможность производить диагностику сложных процессов, например, таких, как расследование аварий, включающих ЧФ.

Теорема Байеса является основой для создания БСД и позволяет учитывать как статистические, так и экспертные оценки вероятности происшествия и его причин, а также обновлять априорную вероятность событий по мере поступления новых данных. БСД эффективно применяются в исследованиях ИМО по формализованной оценке безопасности⁵ для принятия решений по разработке различных инструментов, связанных с безопасностью мореплавания и защитой морской среды^{6, 7, 8}.

Допустим, что в некотором сложном навигационном районе суда периодически садятся на грунт. Обозначим посадку судна на грунт, как событие A . Такие происшествия происходят по различным причинам H_i . Вероятность реализации каждой из этих причин обозначим $P(H_i)$. Это априорная вероятность любой причины посадки на грунт.

Предположим, что произошла посадка на грунт. Для оценки вероятности $P(H_k|A)$, т. е. вероятности того, что именно причина H_k привела к посадке судна на грунт (апостериорная вероятность) применяется теорема (формула) Байеса.

$$P(H_k | A) = \frac{P(H_k)P(A | H_k)}{\sum_{i=1}^n P(H_i)P(A | H_i)}$$

Здесь $P(H_k)$ — априорная вероятность реализации опасности H_k ;

$P(A|H_k)$ — условная вероятность того, что событие A произошло по причине реализации опасности H_k (одна из опасностей, входящих в множество размерности n);

$P(H_k|A)$ — апостериорная вероятность реализации опасности H_k , т. е. обновленная вероятность опасности H_k при условии, что событие A уже произошло;

$P(A|H_i)$ — условные вероятности события A из-за влияния любой опасности H_i .

Знаменатель формулы представляет полную вероятность $P(A)$ события A с учетом всех n опасностей H_i .

Построение БСД. Рассмотрим пример БСД, связывающий непосредственную причину посадки судна на грунт (пропуск поворота) с влиянием когнитивных опасностей H_1-H_8 , описанных в публикации [16]. Сеть построена с помощью академической версии программного пакета GENIe (рис. 2). Для полноты модели в нее введен узел H_9 (другие причины пропуска поворота), не относящийся к ЧФ.

Направленные ребра графа, соединяющие узлы БСД, задают причинно-следственные связи между узлами на основе условных вероятностей. В контексте сети когнитивные опасности H_1-H_8 при их реализации играют роль *причин снижения вероятностей* уровней владения ситуацией SA1–SA3. При появлении новых *наблюдаемых данных* информация в узлах обновляется с помощью формулы Байеса, т. е. становится апостериорной.

⁵ MSC–MEPC.2/Circ.12/Rev.3: Revised guidelines for formal safety assessment (FSA) for use in the IMO rule-making process, IMO, London, 2025. 74 p.

⁶ MSC 81/INF.9: Study on ECDIS/ENCs: Details on Risk Assessments and Cost Benefit Assessments, IMO, London, 2006. 92 p.

⁷ NAV 51/10: FSA-Large Passenger Ships-Navigational Safety, IMO, London, 2005. 118 p.

⁸ MSC 83/INF.3: Liquefied Natural Gas (LNG) Carriers Details of the Formal Safety Assessment, IMO, London, 2007. 149 p.

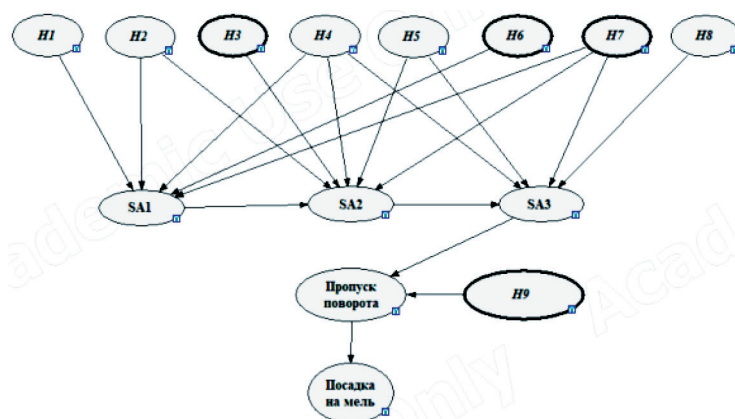


Рис. 2. Структура БСД посадки судна на грунт из-за влияния когнитивных опасностей

В качестве априорной информации в модель БСД включены статистические данные для опасностей H_1 , H_2 , H_4 , H_5 и H_8 , полученные в работе [15], извлеченные из более чем 500 отчетов электронного ресурса МАИВ⁹. Для опасностей H_3 , H_6 , H_7 в БСД применены экспертные оценки ввиду отсутствия конкретной статистики, так как эти опасности практически не распознаются в отчетах по расследованию аварий. Например, таблица условных вероятностей для узла SA2 (понимание), включающая экспертные оценки, выглядит следующим образом:

H_3	$H_3_да$				$H_3_нет$			
H_5	$H_5_да$		$H_5_нет$		$H_5_да$		$H_5_нет$	
SA1 Восприятие	SA1_да	SA1_нет	SA1_да	SA1_нет	SA1_да	SA1_нет	SA1_да	SA1_нет
SA2_да	0,4	0,01	0,5	0,01	0,6	0,01	0,7	0,01
SA2_нет	0,6	0,99	0,5	0,99	0,4	0,99	0,3	0,99

Начальная (априорная) БСД описывает распределение вероятностей узлов модели, основанное на априорных данных и исходных экспертных оценках, которое является началом дальнейшего обновления знаний об исследуемом процессе или системе, что достигается с помощью теоремы Байеса на основе фактических или моделируемых данных.

Априорная БСД позволяет определить начальную согласованную по условным вероятностям картину посадок на грунт в гипотетическом районе плавания, а также решать обратные задачи по оценке апостериорных вероятностей причин посадок на грунт.

Результаты (Results)

На рис. 3 приведены результаты решения обратной задачи по уточнению априорных вероятностей причин $P(H_i) \rightarrow P(H_j)$ посадки судна на грунт, полученные с помощью представленной БСД, а также апостериорные результаты уточнения полноты уровней владения ситуацией судоводителем. Начальные значения SA1–SA3 заданы априорными условными вероятностями. Посадка на грунт привела к переосмысливанию оценки влияния владения ситуацией судоводителем на мостике как на уровне восприятия, так и на уровне понимания и прогнозирования, что подтверждает адекватность логики построенной БСД. Необходимо принять к сведению, что, например, вероятность понимания ситуации, т. е. уровень SA2, зависит не только от указанной вероятности причины H_2 , но и от вероятности уровня восприятия SA1. В то же время вероятность корректного прогноза ситуации SA3 также зависит от вероятностей нескольких входных переменных.

⁹ МАИВ — Marine Accident Investigation Branch.

Темным фоном на рис. 3, а обозначены графики априорных вероятностей причин посадки на грунт при плавании судна в гипотетической акватории. Как видно из рисунка, наибольшее влияние на вероятность посадки на грунт оказывает причина H_4 — стрессоры. После посадки на грунт уверенность в том, что именно H_4 явилась основной причиной, возросла на 9 %. На рис. 3, б графики представляют априорную и апостериорную вероятность уровней владения ситуацией судоводителем. По результатам анализа причин уже случившейся посадки на грунт БСД показала существенное снижение уровней владения ситуацией вахтой на мостике. Так, вероятность восприятия окружающей информации составила всего 68 %, понимания — 39 %, а вероятность корректного прогнозирования ситуации снизилась до 5 %.

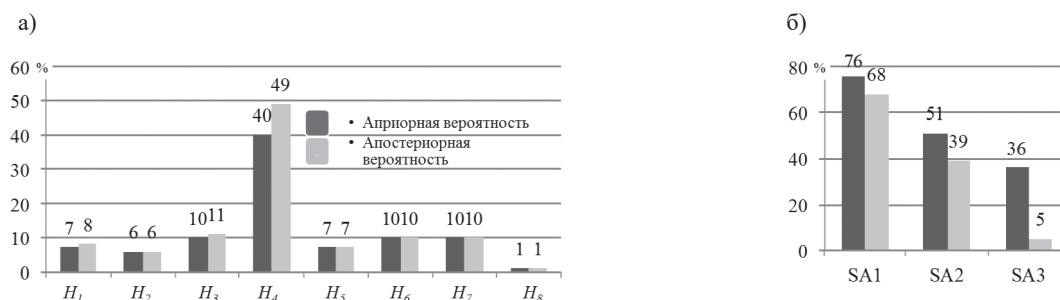


Рис. 3. Априорные и апостериорные вероятности причин посадки судна на грунт:
а — динамика изменения H_1 – H_8 ; б — изменение уровней владения ситуацией судоводителем

На рис. 4, а представлена априорная и апостериорная вероятность пропуска поворота как непосредственной причины уже совершенной посадки судна на грунт. Интерпретация ситуации может быть представлена так, что если произошла посадка на грунт, то апостериорная вероятность того, что причиной происшествия послужил именно пропуск поворота, составляет 98 %. Априорно предполагалось, что из 60 % посадок судов на грунт в данном районе только в 65 % случаев причинами посадок судов были пропуски поворотов.

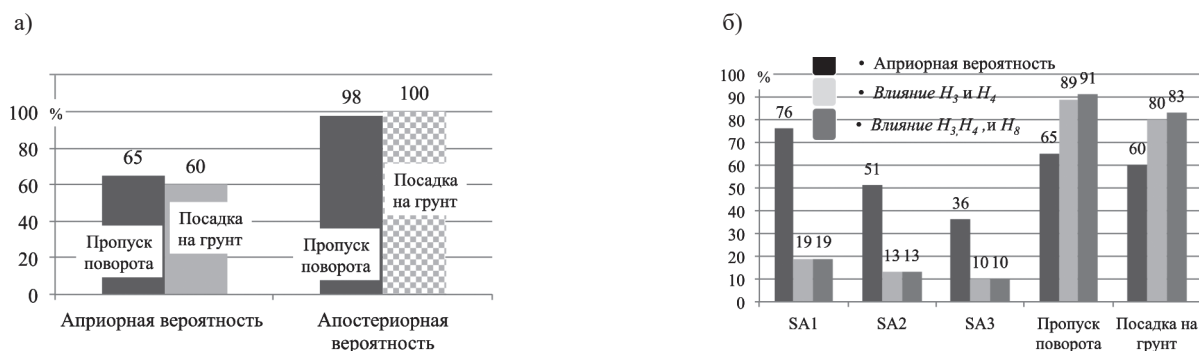


Рис. 4. Априорные и апостериорные вероятности узлов БСД:
а — обновление вероятности пропуска поворота как причины после подтверждения посадки на грунт;
б — результаты совместного влияния причин H_3, H_4 и H_8 на уровни владения ситуацией, пропуск поворота и посадку на грунт

Часть возможностей БСД решения прямой задачи в качестве примера представлены графиками на рис. 4, б, на котором показаны результаты моделирования прямой задачи о влиянии реализации ряда когнитивных опасностей на вероятность пропуска поворота и посадки судна на грунт. Если сопоставить графики одного цвета, то видно, что вероятности пропуска поворота и посадки на грунт увеличиваются из-за снижения уровней владения ситуацией вахтой на мостике.

Предположим, что на полноту владения ситуацией судоводителем оказывает влияние совместная реализация опасностей H_3 и H_4 . Это снижает восприятие им информации до 19 %, понимание воспринятой информации до 13 %, а прогнозирование ситуации до 10 %, что в свою

очередь повышает вероятность пропуска поворота до 89 % и посадки на грунт до 80 %. В данном случае вероятность пропуска поворота больше вероятности посадки на грунт. В соответствии с полученными результатами можно предположить, что не обязательно все пропуски поворота могут приводить к посадке судна на грунт. Часть из них создают потенциально опасные ситуации, которые безопасно разрешаются волей случая или действиями экипажа и характеризуются как *почти происшествие*.

Добавление в качестве причины реализации опасности H_8 (судоводитель находится вне контура управления) не оказывает влияния на владение ситуацией вследствие низкой чувствительности связи между соответствующими узлами модели, но тем не менее повышает вероятность пропуска поворота до 91 % и посадки на грунт до 83 %.

Обсуждение (Discussion)

В статье показан прототип модели БСД, описывающий причинно-следственную условную вероятностную связь между событиями, которые последовательно представляют потенциальные когнитивные опасности, отрицательно влияющие на уровни владения ситуацией судоводителем при несении ходовой навигационной вахты и далее на вероятность непосредственной причины посадки на грунт, которая приводит к происшествию. Вероятность происшествия является основной компонентой оценки риска как на стратегическом, так и на оперативном уровне управления безопасностью в СУБ¹⁰ судна и компании. БСД позволяет осуществлять вероятностные прогнозы и решать обратную задачу об оценке вероятности причин происшествия при его возникновении, т. е. решать задачу по расследованию причин происшествия, тем самым изменяя мнение эксперта, расследующего происшествие.

Следует отметить, что настройка таблиц условных вероятностей в представленной БСД включает экспертные оценки. Полученные результаты подтвердили непротиворечивость включенных данных и показали корректную логику построенной БСД. Так, все апостериорные результаты, как видно из графиков рис. 3, а, подтвердили априорные гипотезы, оказывающие влияние на вероятность посадки судна на грунт, причем наибольшее подтверждение получила причина H_4 , а также H_3 , H_6 и H_7 , что по результатам моделирования должно стимулировать компанию к разработке мер по управлению риском для снижения влияния этих опасностей на судовые операции. Вероятностный апостериорный рейтинг опасностей не изменился, что в принципе, свидетельствует об адекватности статистических и экспертных данных, включенных в таблицы условных вероятностей модели БСД.

Результат снижения вероятностей апостериорных уровней владения ситуацией по сравнению с априорными принципиально адекватен сути развития навигационной ситуации. Так, после посадки судна на грунт расследование смоделированного происшествия в соответствии с моделью БСД показало, что *вероятность восприятия* судоводителем навигационной информации была снижена с 76 % до 19 %, *вероятность понимания* ситуации — с 51 % до 13 %, а *вероятность корректного прогнозирования ситуации* — с 36 % до 10 %. Все это явилось причиной повышения *вероятности пропуска поворота* с 65 % до 98 % и *увеличения вероятности посадки на грунт* с 60 % до реального происшествия.

Выводы (Summary)

На основании выполненного исследования можно сделать следующие выводы:

1. Представлен прототип БСД, включающий когнитивные опасности, реализация которых трансформирует их в причины, снижающие вероятность необходимой полноты владения ситуацией судоводителем при несении ходовой навигационной вахты и приводящие к созданию потенциально опасных ситуаций или реальных происшествий.

2. Оценка вероятности происшествий в судовых операциях с учетом ЧФ является важной составляющей процедур выявления и ранжирования опасностей при оценке риска, поэтому она

¹⁰ СУБ — система управления безопасностью.

должна быть встроена в СУБ судоходных компаний и их судов, что принципиально соответствует требованиям МКУБ¹¹.

3. БСД, являясь одним из математических инструментов, позволяющих производить анализ эффективности СУБ, включая процедуры расследования происшествий и потенциально-опасных ситуаций, причинами которых является ЧФ, дает возможность объединять статистическую и экспертную вероятностную информацию в таких непростых задачах, как выявление когнитивных опасностей, оказывающих влияние на владение ситуацией судоводителем при несении им ходовой навигационной вахты.

4. Корректно спроектированная БСД позволяет прогнозировать вероятностное состояние узлов сети по сценарию «Что, если...», т. е. является ключом для анализа различных сценариев развития событий с привлечением апостериорной вероятности. Это служит эффективным инструментом в расследовании происшествий, позволяющим уточнять вероятности причин происшествия, а также исследовать одновременное влияние нескольких причин на происшествие и осуществлять диагностику принятия решений на основе условных вероятностей событий.

5. Несмотря на то, что БСД является ациклическим графом, она позволяет осуществлять эффект обратной связи через обмен вероятностной информацией между узлами с учетом реально произошедших или смоделированных событий. Это дает возможность обновлять информацию о причинах происшествий и более обоснованно проводить их расследование, включая также анализ потенциально опасных ситуаций с учетом ЧФ. БСД позволяет включать алгоритм непрерывного совершенствования в процедуры оценки риска и тем самым повышать эффективность СУБ. Распространение новых данных о происшествии по всем узлам БСД, дает возможность уточнять априорные данные модели, тем самым получать информацию для разработки новых мер по управлению риском в судовых операциях.

6. Метод обладает рядом ограничений: при недостатке статистических данных для настройки сети требуется наличие экспертной информации, что не всегда является доступным, особенно если это касается такой сложной тематики, как человеческий фактор; для больших сетей возникает проблема вычислительной сложности, а ограниченность данных может привести к недостаточной адекватности полученных оценок.

7. При построении БСД входные переменные предполагаются статистически независимыми, что является одним из условий построения сети. Это относится и к когнитивным опасностям H_1-H_8 , влияющим на выполнение функциональных обязанностей судоводителем. В реальности это условие может не выполняться, но БСД позволяет оценивать одновременно влияние нескольких входных параметров на один узел, т. е. практически компенсировать это ограничение. Такое упрощение теории вполне укладывается в постановку практических задач, не требующих бесконечного количества данных. Предложенная в статье структура БСД может служить прототипом для построения более полной сети, способной анализировать эффективность и уровень адаптивности СУБ компании к изменению условий эксплуатации ее судов с точки зрения влияния человеческого фактора.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Macrae C. Human factors at sea: common patterns of error in groundings and collisions / C. Macrae // Maritime Policy & Management. — 2009. — Vol. 36. — Is. 1. — Pp. 21–38. DOI: 10.1080/03088830802652262.
2. Grech M. R. Human Error in Maritime Operations: Analyses of Accident Reports Using the Leximancer Tool / M. R. Grech, T. Horberry, A. Smith // Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting. — 2002. — Vol. 46. — Is. 19. — Pp. 1718–1721. DOI: 10.1177/154193120204601906.
3. Sandh H. Situation awareness in bridge operations — A study of collisions between attendant vessels and offshore facilities in the North Sea / H. Sandhåland, H. Oltedal, J. Eid // Safety Science. — 2015. — Vol. 79. — Pp. 277–285. DOI: 10.1016/j.ssci.2015.06.021.

¹¹ МКУБ — Международный кодекс по управлению безопасной эксплуатацией судов и предотвращением загрязнения.

4. Galierikov A. The human factor and maritime safety / A. Galieriková // *Transportation Research Procedia*. — 2019. — Vol. 40. — Pp. 1319–1326. DOI: 10.1016/j.trpro.2019.07.183.
5. Логиновский В. А. Закон Хайнриха: расширение матрицы оценки риска в область человеческого фактора / В. А. Логиновский // *Вестник государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова*. — 2018. — Т. 10. — № 4. — С. 696–704. DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-4-696-704. — EDN VKFCMH.
6. Baric M. The role of the ECDIS on the Development of Situational Awareness — a study on grounding accidents / M. Baric, L. Grbic, L. Peričin, R. Jelic // *TransNav the International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation*. — 2023. — Vol. 17. — Is. 1. — Pp. 219–225. DOI: 10.12716/1001.17.01.24.
7. Brcko T. Investigating the Human Factor in Maritime Accidents: A focus on Compass-Related Incidents / T. Brcko, I. Pavić, J. Mišković, A. Androjna // *Transactions on Maritime Science*. — 2023. — Vol. 12. — Is. 2. DOI: 10.7225/toms.v12.n02.w01.
8. Hasanspahi N. The Role of the Human Factor in Marine Accidents / N. Hasanspahić, S. Vujčić, V. Frančić, L. Čampara // *Journal of Marine Science and Engineering*. — 2021. — Vol. 9. — Is. 3. DOI: 10.3390/jmse9030261.
9. Козик С. В. Структурирование терминологического аппарата, используемого при анализе влияния человека на безопасность судоходства / С. В. Козик // *Вестник государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова*. — 2025. — Т. 17. — № 2. — С. 216–232. DOI: 10.21821/2309-5180-2025-17-2-216-232. — EDN KMRRYP.
10. Томилин А. Н. О негативном влиянии человеческого фактора на безопасность мореплавания / А. Н. Томилин, А. М. Дорофеев, Е. М. Дорофеев // *Эксплуатация морского транспорта*. — 2022. — № 2(103). — С. 24–31. DOI: 10.34046/aumsuomt103/8. — EDN TRKFNB.
11. W. M. P. Steijn An integration of human factors into quantitative risk analysis using Bayesian Belief Networks towards developing a ‘QRA+’ / W. M. P. Steijn, J. N. Van Kampen, D. Van der Beek, J. Groeneweg, P. H. A. J. M. Van Gelder // *Safety Science*. — 2020. — Vol. 122. — Pp. 104514. DOI: 10.1016/j.ssci.2019.104514.
12. Qiao W. Human Factors Analysis for Maritime Accidents Based on a Dynamic Fuzzy Bayesian Network / W. Qiao, Y. Liu, X. Ma, Y. Liu // *Risk Analysis*. — 2020. — Vol. 40. — Is. 5. — Pp. 957–980. DOI: 10.1111/risa.13444.
13. Endsley M. R. Theoretical underpinnings of situation awareness: A critical review / M. R. Endsley, D. J Garland // *Situation awareness analysis and measurement*. — 2000. — Vol. 1. — Is. 1. — С. 3–21.
14. M. R. Endsley Situation awareness and human error: Designing to support human performance / M. R. Endsley // *Proceedings of the high consequence systems surety conference — Albuquerque*, 1999. — С. 2–9.
15. Stratmann T. C. Demon Hunt — The Role of Endsley’s Demons of Situation Awareness in Maritime Accidents / T. C. Stratmann, S. Boll // *Human-Centered and Error-Resilient Systems Development — Springer International Publishing*, 2016. — С. 203–212.
16. Endsley M. R. SA Demons: The Enemies of Situation Awareness / M. R. Endsley, D. G. Jones // *Designing for situation awareness — CRC Press*, 2011. — С. 31–41. DOI: 10.1201/9781003388234.

REFERENCES

1. Macrae, C. “Human factors at sea: common patterns of error in groundings and collisions.” *Maritime Policy & Management* 36.1 (2009): 21–38. DOI: 10.1080/03088830802652262.
2. Grech, M. R., T. Horberry and A. Smith. “Human Error in Maritime Operations: Analyses of Accident Reports Using the Leximancer Tool.” *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting* 46.19 (2002): 1718–1721. DOI: 10.1177/154193120204601906.
3. Sandh, H., H. Oltedal and J. Eid. “Situation awareness in bridge operations — A study of collisions between attendant vessels and offshore facilities in the North Sea.” *Safety Science* 79 (2015): 277–285. DOI: 10.1016/j.ssci.2015.06.021.
4. Galierikov, A. “The human factor and maritime safety.” *Transportation Research Procedia* 40 (2019): 1319–1326. DOI: 10.1016/j.trpro.2019.07.183.
5. Loginovskiy, V. A. “Heinrich’s law: expansion of risk assessment matrix into human factor area.” *Vestnik gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 10.4 (2018): 696–704. DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-4-696-704.
6. Baric, M., L. Grbic, L. Peričin and R. Jelic. “The role of the ECDIS on the Development of Situational Awareness — a study on grounding accidents.” *TransNav the International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation* 17.1 (2023): 219–225. DOI: 10.12716/1001.17.01.24.

7. Brcko, T., I. Pavić, J. Mišković and A. Androjna. "Investigating the Human Factor in Maritime Accidents: A focus on Compass-Related Incidents." *Transactions on Maritime Science* 12.2 (2023). DOI: 10.7225/toms.v12.n02.w01.
8. Hasanspahi, N., S. Vujičić, V. Frančić and L. Čampara. "The Role of the Human Factor in Marine Accidents." *Journal of Marine Science and Engineering* 9.3 (2021). DOI: 10.3390/jmse9030261.
9. Kozik, S. V. "Structuring of the terminological apparatus used in the analysis of the influence of the human factor on the safety of navigation." *Vestnik gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admiral S. O. Makarova* 17.2 (2025): 216–232. DOI: 10.21821/2309-5180-2025-17-2-216-232.
10. Tomilin, A. N., A. M. Dorofeev and E. M. Dorofeev. "About the negative impact of the human factor on the safety of navigation." *Ekspluatatsiya morskogo transporta* 2(103) (2022): 24–31. DOI: 10.34046/aumsuomt103/8.
11. W. M. P. Steijn, J. N. Van Kampen et al. "An integration of human factors into quantitative risk analysis using Bayesian Belief Networks towards developing a 'QRA+'." *Safety Science* 122 (2020): 104514. DOI: 10.1016/j.ssci.2019.104514.
12. Qiao, W., Y. Liu, X. Ma and Y. Liu. "Human Factors Analysis for Maritime Accidents Based on a Dynamic Fuzzy Bayesian Network." *Risk Analysis* 40.5 (2020): 957–980. DOI: 10.1111/risa.13444.
13. Endsley, M. R. and D. J Garland. "Theoretical underpinnings of situation awareness: a critical review." *Situation Awareness Analysis and Measurement* 1.1 (2000): 3–21.
14. Endsley, M. R. "Situation awareness and human error: designing to support human performance." *Proceedings of The High Consequence Systems Surety Conference* Albuquerque, 1999: 2–9.
15. Stratmann, T. C. and S. Boll. "Demon Hunt — The Role of Endsley's Demons of Situation Awareness in Maritime Accidents." *Human-Centered and Error-Resilient Systems Development* Springer International Publishing, 2016: 203–212.
16. Endsley, M. R. and D. G. Jones. "SA Demons: The Enemies of Situation Awareness." *Designing for situation awareness*. CRC Press, 2011: 31–41. DOI: 10.1201/9781003388234.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

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

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

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

*Статья поступила в редакцию 15 декабря 2025 г.
Received: Dec. 15, 2025.*

MAKING A DECISION ON THE TRANSSHIPMENT OF BULK CARGOES THROUGH A CONTAINER TERMINAL BASED ON A SYSTEMATIC APPROACH

O. A. Izotov, N. S. Polubotko

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

This study addresses the assessment of optimal decision-making for the organization of delivery and transshipment of bulk cargoes through a sea container terminal using a systematic approach. The topic is relevant due to declining container traffic at domestic seaports and the need to explore the potential use of freed port capacities for handling cargoes that are not typical for such facilities, particularly packaged and bulk fertilizers from manufacturing plants located deep in the hinterland or beyond its borders. Applying a systematic approach as an effective problem-solving tool allows the complex process of forming a transport system for product promotion to be divided into several subsystems, each addressing specific tasks. In particular, subsystems for transporting bulk cargo to the terminal and conducting loading and unloading operations at the seaport are considered to identify a single optimal technology for the overall process. It is emphasized that decisions regarding organization and management of the technology cannot rely solely on assessments of the production capabilities of individual links in the cargo promotion chain; instead, a comprehensive analysis of all system components is required. In this study, decisions regarding delivery and transshipment of bulk cargoes through the container terminal are proposed to be based on preliminary assessments of the capacities of cargo handling complexes included in the transport system. The conclusion highlights that achieving the planned volumes of bulk cargo delivery and shipment with minimal time and cost is possible only when all factors affecting the system's operation as a whole are considered.

Keywords: cargo promotion chain, technological solutions, systematic approach, bulk cargo delivery, heavy-load containers, various packaging methods, cargo handling equipment, unified approach, structural components, decision-making algorithms.

For citation:

Izotov, Oleg A. and N. S. Polubotko. "Making a decision on the transshipment of bulk cargoes through a container terminal based on a systematic approach." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admiral S. O. Makarova* 18.1 (2026): 60–67. DOI: 10.21821/2309-5180-2026-18-1-60-67.

УДК 656.073.7

ПРИНЯТИЕ РЕШЕНИЯ О ПЕРЕВАЛКЕ НАСЫПНЫХ ГРУЗОВ ЧЕРЕЗ КОНТЕЙНЕРНЫЙ ТЕРМИНАЛ НА ОСНОВЕ СИСТЕМНОГО ПОДХОДА

О. А. Изотов, Н. С. Подуботко

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

Темой исследования является оценка возможности принятия оптимального решения организации доставки и перевалки насыпных грузов через морской контейнерный терминал на основе системного подхода. Актуальность темы обусловлена снижением контейнеропотока на отечественных морских терминалах и необходимостью изучения возможности привлечения высвободившихся мощностей портов к переработке нетрадиционных для таких площадок грузов, в частности удобрений, следующих в упаковке и навалом с заводов-производителей, расположенных в глубине или даже за границами хинтерленда. Применение системного подхода как эффективного инструмента поиска новых решений позволяет разделить весь рассматриваемый процесс формирования сложной транспортной системы, призванной обеспечить продвижение продукции, на несколько подсистем, решающих отдельные задачи. В частности, к рассмотрению предложены подсистемы доставки насыпного груза на терминал и про-

ведения погрузочно-разгрузочных операций непосредственно в морском порту с тем, чтобы определить единую оптимальную технологию для процесса в целом. Обращается внимание на то, что решения по организации и управлению рассматриваемой технологии не могут приниматься с опорой на оценку производственных возможностей отдельных звеньев цепи продвижения продукции, отвечающих за выполнение возложенных на них функций в своей зоне ответственности, они требуют всестороннего анализа деятельности всех компонентов. В предлагаемой работе решения о доставке и перевалке насыпных грузов через морской контейнерный терминал предлагается принимать на основе предварительной оценки мощностей грузовых комплексов, включенных в рассматриваемую транспортную систему. В качестве вывода подчеркивается, что доставка и отгрузка запланированных объемов насыпных грузов с минимальными временными и стоимостными издержками возможна только при учете всех факторов, оказывающих влияние на работу системы в целом.

Ключевые слова: цепочка продвижения грузов, технологические решения, системный подход, доставка насыпного груза, большегрузные контейнеры, различные средства упаковки, перегрузочные средства и оборудование, единый подход, структурные части и звенья, алгоритмы решений.

Для цитирования:

Изотов О. А. Принятие решения о перевалке насыпных грузов через контейнерный терминал на основе системного подхода / О. А. Изотов, Н. С. Полуботко // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2026. — Т. 18. — № 1. — С. 60–67. DOI: 10.21821/2309-5180-2026-18-1-60-67. — EDN NPADXR.

Введение (Introduction)

Оценка возможности организации перевалки насыпного груза на контейнерном терминале и поиск вариантов проведения перегрузочных операций в условиях отсутствия специального оборудования требуют применения системного подхода как эффективного инструмента поиска новых решений, разделяющих такой достаточно сложный процесс на несколько подсистем и вырабатывающих единый подход. В данном случае целесообразно отдельно рассмотреть вопросы доставки насыпного груза на терминал и операций проведения погрузочно-разгрузочных работ в морском порту с тем, чтобы определить единую оптимальную технологию для процесса в целом.

В практике перевозок удобнее применяются следующие технологические решения: доставка насыпью в подвижном составе смежных видов транспорта и применение различных средств упаковки. Такие решения обуславливают применение тех или иных видов перегрузочного оборудования на морских терминалах, обеспечивающего перевалку грузов с заданным темпом обработки.

Использование системного подхода в процессе доставки удобрений в морской порт для последующей перевалки на суда позволяет разделить цепочку продвижения грузов на *взаимовлияющие* и *взаимодополняющие* друг друга структурные части и звенья, выполняющие функции по достижению общей цели. При этом решения по организации и управлению указанной технологии не могут опираться на оценку возможностей отдельных элементов, отвечающих за выполнение возложенных на них функций в зоне своей ответственности, они требуют всестороннего анализа деятельности всех компонентов, участвующих в процессе [1]. Такой анализ необходим для построения алгоритмов принятия решения о доставке насыпных грузов на морской контейнерный терминал и организации хранения и перегрузки грузов на морские суда. Полученные таким образом алгоритмы решений позволят произвести наиболее полный учет необходимых данных и будут способствовать сокращению сроков обработки сопутствующей информации, связанной с осуществляемыми на видах транспорта технологическими операциями и процессами.

Методы и материалы (Methods and Materials)

Взаимосвязь структурных объектов видов транспорта при перевозке насыпного груза определена особыми условиями транспортировки и перегрузки удобрений, требующих соблюдения влажностного режима, т. е. применения средств сохранности груза на всех этапах его продвижения. Таким образом, условия отправки удобрений с завода-производителя оказывают непосредственное влияние на возможность организации его перевалки в морском порту.

Исходя из современного состояния товарной базы, возможностей магистральных видов транспорта, а также оценки объемов и сроков выполнения средствами транспорта заданных перевозок, рассмотрим три варианта отгрузки удобрений в железнодорожный подвижной состав (рис. 1):

- без упаковки, насыпью в хопперы;
- в мягкие контейнеры различной грузоподъемности с последующей отправкой в полувагонах;
- в большегрузные контейнеры, установленные на железнодорожных платформах маятниковыми маршрутами.

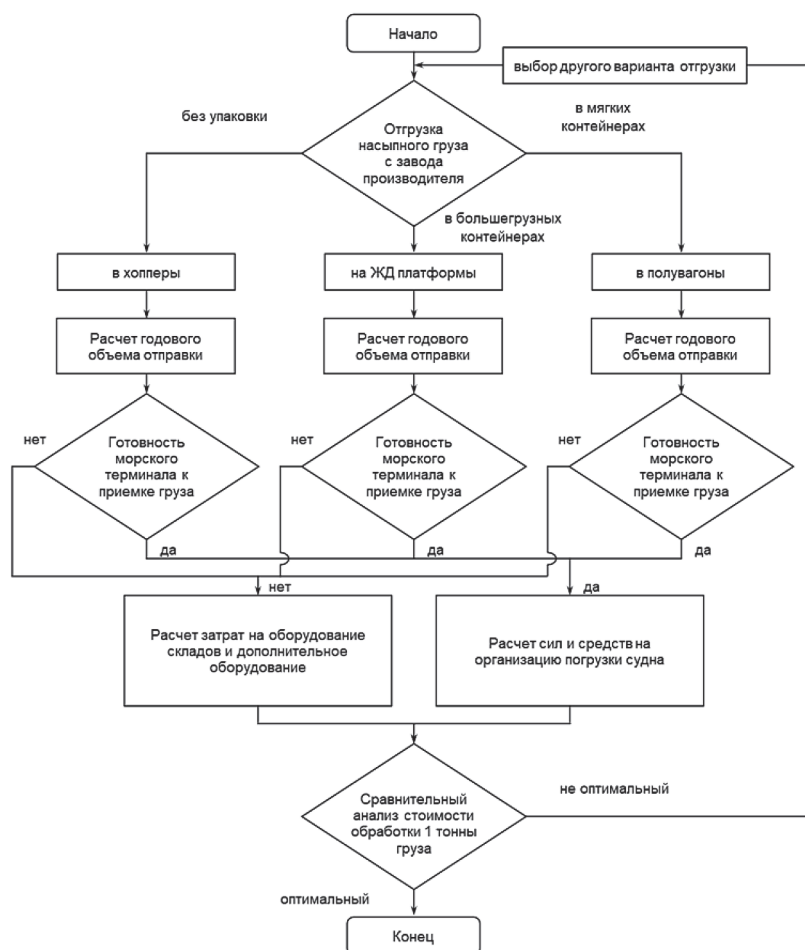


Рис. 1. Укрупненная блок-схема принятия решения о перевалке насыпных грузов через контейнерный терминал

Рассмотрим положительные и отрицательные стороны выделенных вариантов отгрузки удобрений. Отгрузка и поступление груза насыпью без упаковки требует привлечения перегрузочно-го оборудования непрерывного действия, обеспечивающего высокопроизводительные показатели только в условиях стационарности своего расположения на заводе и причале, что требует формирования современных бункерно-конвейерных систем. На заводе-изготовителе удобрения в силу массовости производства чаще всего хранятся в бункерах, предназначенных для дальнейшей отгрузки. Для перевалки удобрений морским контейнерным терминалам необходимы устройства выгрузки из хопперов, средства передачи груза для накопления на причал и устройство для укрытия груза при хранении, а также средства погрузки на судно, т. е. разработка и внедрение технологий, соответствующих грузу и заданным нормативам работ [2, 3].

Отправка грузов в мягких контейнерах предполагает наличие оборудования и площадок затарки таких контейнеров, средств их транспортировки на склад хранения для накопления и по-

следующей отгрузки в полувагоны. Загрузка полувагонов мягкими контейнерами с удобрениями может производиться автокранами достаточной грузоподъемности по мере подачи подвижного состава с железнодорожной грузовой станции, что, безусловно, должно отразиться на темпах отгрузки. Такие же грузовые операции ожидают груз и в порту перевалки на суда. При этом следует отметить, что контейнерный терминал, как правило, не имеет крытых складских помещений для хранения удобрений в мягкой упаковке [4].

Затарка удобрений в большегрузные контейнеры может производиться через верхние люки, т. е. по традиционной для завода-изготовителя схеме. При этом обработка заявленного груза на контейнерном терминале возможна по существующим в порту технологиям [5, 6].

Таким образом, реализация предложенной цепочки продвижения грузов опирается на технологические возможности узлов погрузки и выгрузки насыпного груза в/из средства укрупнения грузовых мест, что не требует применения в пунктах обработки нетрадиционных для них перегрузочных средств и технологий.

Результаты (Results)

Таким образом, для выработки оптимального решения по доставке и перевалке удобрений через морской контейнерный терминал необходимо сформировать и оценить возможности транспортной системы включающей две подсистемы:

- система транспортировки груза на морской терминал;
- система перевалки груза на морские суда.

Первая подсистема ставит перед организатором перевозки задачу разработки и внедрения технологий отгрузки, которые могут обеспечить:

- бесперебойную (ритмичную или периодическую) доставку грузов на морской терминал;
- максимальный (заданный) объем поставок за плановый период;
- минимальные затраты, связанные с поставками;
- выполнение единого технологического процесса работы завода-изготовителя и транспорта [7, 8].

Алгоритм принятия решения на отправку насыпных грузов на морской контейнерный терминал (рис. 2) требует учета указанных ранее факторов и предусматривает расчеты объемных, временных и стоимостных показателей всех возможных i -х вариантов организации транспортировки.

Особые условия к перевозке предъявляются только к большегрузным контейнерам, которые следует рассматривать совместно с железнодорожными платформами, поскольку подвижной состав в этом случае не высвобождается, а после разгрузки контейнеров с грузом сразу загружается порожними контейнерами, специально хранимыми на морском терминале после выгрузки в суда ранее доставленной партии груза, и отправляется на завод-изготовитель кольцевым (маятниковым) маршрутом для загрузки новой партии груза [9, 10]. При этом форма оплаты меняется в соответствии с железнодорожным тарифом на арендные платежи, если, конечно, платформы не принадлежат заводу-поставщику.

Вторая подсистема ставит перед организатором перевалки грузов задачи разработки и внедрения технологий погрузочно-разгрузочных работ, которые могут обеспечить выполнение процесса, направленного на обеспечение следующих процессов:

- бесперебойная (ритмичная или периодическая) перегрузка грузов со смежных видов транспорта на склад и далее на причал и на морское судно согласно принятым нормативам хранения и обработки;
- минимальные затраты, связанные с перевалкой грузов;
- выполнение единого технологического процесса работы смежных и морского видов транспорта [11].

Алгоритм принятия решения о погрузке на судно насыпных грузов на морском контейнерном термине (рис. 3) требует учета всех указанных факторов и предусматривает расчеты объемных,

временных и стоимостных показателей всех возможных i -х вариантов организации перегрузки. Разнообразие форм упаковки и подачи на морской терминал рассматриваемого груза не позволяет сделать вывод о соблюдении единых технологических процессов при проведении погрузочно-разгрузочных работ с применением контейнерных технологий. Как отмечалось ранее, при подаче грузов навалом и в мягких контейнерах терминал будет вынужден произвести наращивание своих мощностей для обработки грузов, нетрадиционных для его площадок.

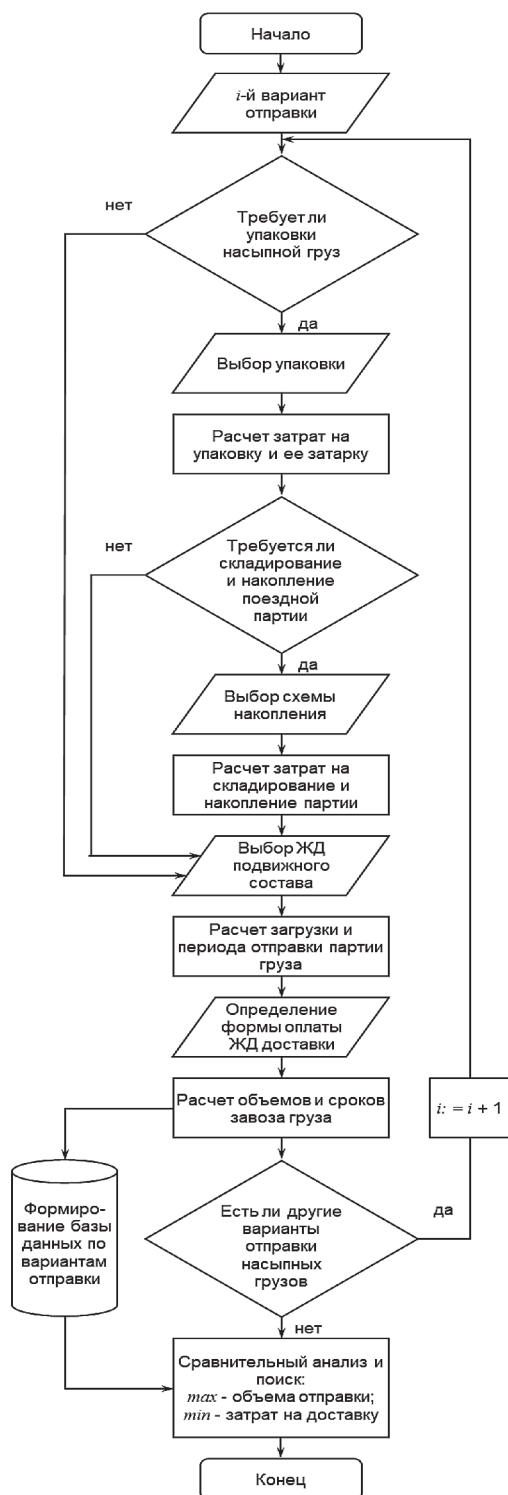


Рис. 2. Укрупненный алгоритм принятия решения о доставке насыпных грузов на морской контейнерный терминал

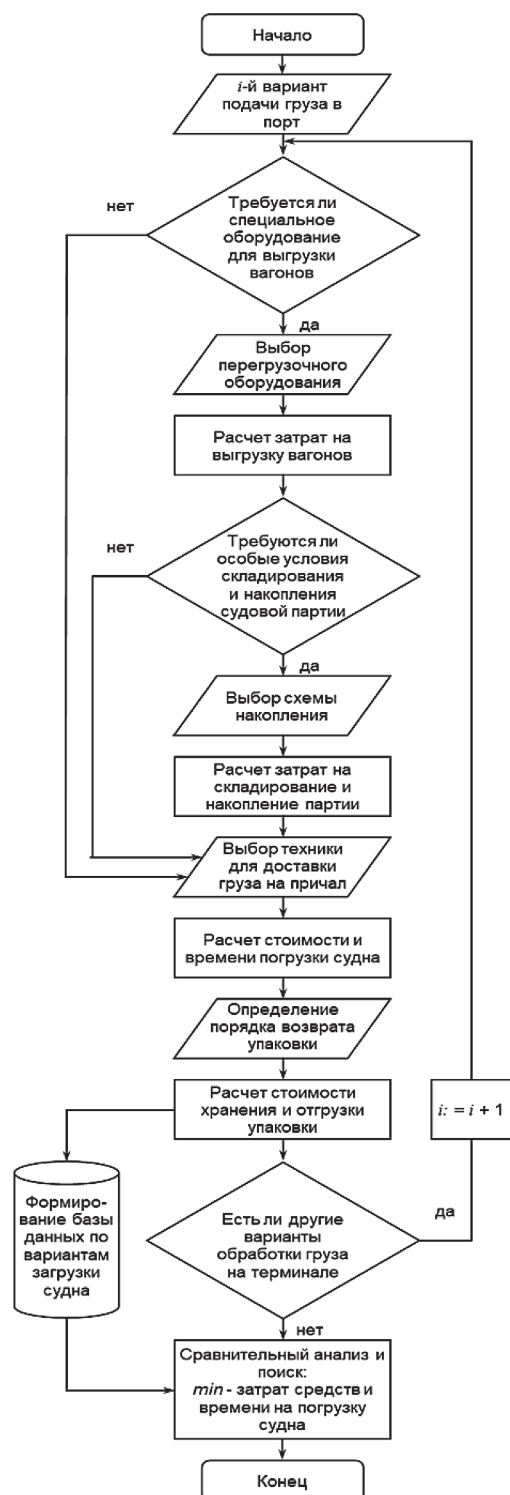


Рис. 3. Укрупненный алгоритм принятия решения о погрузке на судно насыпных грузов на морском контейнерном термине

При этом привлечение на морские контейнерные терминалы нетрадиционных для них насыпных грузов носит явно выраженный временный характер и производится в целях увеличения грузооборота в условиях падения контейнеропотока на фоне западных санкций. Следовательно, обработка таких грузов не должна нарушать схем механизации, разработанных для обработки крупнотоннажных контейнеров. При этом перед отправителем, основным видом транспорта и морским контейнерным терминалом ставится общая задача по определению оптимального с точки зрения всех участников процесса решения по продвижению на потребительский рынок востребованной продукции с наименьшими издержками сторон.

Принятие решения о доставке и перевалке насыпных грузов через морской контейнерный терминал требует предварительной оценки расчетов мощностей грузовых комплексов всех объектов, включенных в формируемую для выполнения указанных процессов транспортную систему.

Совместная работа структурных подразделений и звеньев видов транспорта, направленная на достижение поставленной цели, может привести к желаемому результату, но доставка и отгрузка запланированных объемов насыпных грузов с минимальными временными и стоимостными издержками возможна только при учете всех факторов, оказывающих влияние на работу системы в целом [12].

Заключение (Conclusion)

Сложность и множественность конкурентоспособных вариантов организации рассмотренной транспортной системы свидетельствует о необходимости предварительной оценки возможных сценариев развития ситуаций как на рынке принимаемых к обработке грузов, так и на рынке транспортных услуг, что еще раз подчеркивает важность выбора конечной транспортной структуры.

Системный подход позволяет учесть взаимосвязи между структурами и объектами формируемой транспортной системы, а также с помощью организации их согласованной работы оценить возможности такой системы в целом и добиться выполнения запланированных объемов поставок.

Формирование на основе системного подхода алгоритмов принятия решения о доставке насыпных грузов на морской контейнерный терминал, увеличении их объема до судовой партии и временного хранения до последующей погрузки грузов на морские суда позволит перейти к следующему этапу внедрения оптимальной технологии по перевалке удобрений на традиционно не предназначенных для этого площадках, а именно к разработке программного обеспечения для ЭВМ. Таким образом, в перспективе возможна автоматизация процессов принятия решений, направленных на анализ возможности и выработку управленческих решений по привлечению морских контейнерных терминалов, временно «выпавших» из международных контейнерных грузопотоков на фоне санкционной политики Запада.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Калентьева Ю. Н.* Проблема применения системного подхода и системного анализа в принятии управленческих решений / Ю. Н. Калентьева // Экономика, управление, финансы: материалы IX Международной научной конференции, Санкт-Петербург, 20–23 октября 2018 года. — Санкт-Петербург: Свое издательство, 2018. — С. 44–46. — EDN YLEEVV.
2. *Жендарева Е. С.* Методические особенности оценки эффективности организации транспортного процесса доставки нерудных строительных материалов / Е. С. Жендарева // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока. — 2012. — № 1. — С. 122–125. — EDN PBMUYR.
3. *Вакуленко С. П.* Организация работы контейнерных распределительных терминалов / Вакуленко С. П., Мехедов М. И. [и др.] // Морские порты. — 2024. — № 3. — С. 31–35.
4. *Балашова И. В.* Системы поддержки принятия решений / И. В. Балашова, Т. А. Терещенко // The Scientific Heritage. — 2021. — № 79–4(79). — С. 3–7. DOI: 10.24412/9215-0365-2021-79-4-3-7. — EDN VBGSEN.
5. *Изотов О. А.* Моделирование распределения грузовых потоков сборных партий в зоне хинтерленда морского порта / О. А. Изотов // Вестник государственного университета морского и речного флота имени

адмирала С. О. Макарова. — 2025. — Т. 17. — № 1. — С. 86–93. DOI: 10.21821/2309-5180-2025-17-1-86-93. — EDN XSNRYA.

6. Изотов О. А. Обоснование возможности обработки контейнеризированных навалочных грузов на морском терминале / О. А. Изотов, Н. С. Полуботко // Вестник государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2025. — Т. 17. — № 2. — С. 208–215. DOI: 10.21821/2309-5180-2025-17-2-208-215. — EDN HRYNBC.

7. Черкин Э. А. Управление цепями поставок: лучшая российская и мировая практика / Э. А. Черкин // Транспорт Российской Федерации. — 2013. — № 5(48). — С. 52–54. — EDN RSSCEF.

8. Зимин А. В. Повышение гибкости управления предприятием за счет современных средств математического моделирования и визуализации данных / А. В. Зимин // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника. — 2015. — Т. 15. — № 1. — С. 69–74. — EDN TGZUNV.

9. Изотов О. А. Моделирование схем обработки насыпных контейнеров на морском терминале / О. А. Изотов // Вестник государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2025. — Т. 17. — № 3. — С. 331–339. DOI: 10.21821/2309-5180-2025-17-3-331-339. — EDN DNSARN.

10. Изотов О. А. Применение аппарата теории массового обслуживания при организации перевалки насыпных грузов на контейнерном терминале / О. А. Изотов, Н. С. Полуботко, Е. Е. Марушкина // Вестник государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2025. — Т. 17. — № 4. — С. 493–501. DOI: 10.21821/2309-5180-2025-17-4-493-501. — EDN CLEZQY.

11. Забненков В. С. Концептуальный подход к созданию логистического центра в пунктах взаимодействия железнодорожного и водного транспорта / В. С. Забненков // Речной транспорт (XXI век). — 2011. — № 6(54). — С. 64–69. — EDN RUKBXX.

12. Кузнецов А. Л. Оценка времени доставки в сложных цепях поставки с помощью моделирования / А. Л. Кузнецов, А. В. Кириченко, А. Д. Семенов // Вестник государственного университета морского и речного флота им. адмирала С. О. Макарова. — 2021. — Т. 13. — № 3. — С. 372–383. DOI: 10.21821/2309-5180-2021-13-3-372-383. — EDN TNLNKM.

REFERENCES

1. Kalent'eva, Yu. N. "Problema primeneniya sistemnogo podkhoda i sistemnogo analiza v prinyatii upravlencheskikh resheniy." *Ekonomika, upravlenie, finansy: materialy IX Mezhdunarodnoy nauchnoy konferentsii, Sankt-Peterburg, 20–23 oktyabrya 2018 goda*. Sankt-Peterburg: Svoe izdatel'stvo, 2018: 44–46.

2. Zhendareva, E. S. "Methodical features of the transport process of evaluating the effectiveness of delivery of non-metallic construction materials." *Nauchnye problemy transporta Sibiri i Dal'nego Vostoka* 1 (2012): 122–125.

3. Vakulenko S. P. Organization of work of container distribution terminals / Vakulenko S. P., Mekhedov M. I. et al. // Moscow: Seaports No. 3 (2024). pp. 31–35

4. Balashova, I. V. and T. A. Tereschenko. "Decision support systems." *The Scientific Heritage* 79–4(79) (2021): 3–7. DOI: 10.24412/9215-0365-2021-79-4-3-7.

5. Izotov, O. A. "Modeling of the distribution of cargo flows of combined shipments in the hinterland area of the seaport." *Vestnik gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 17.1 (2025): 86–93. DOI: 10.21821/2309-5180-2025-17-1-86-93.

6. Izotov, O. A. and N. S. Polubotko. "Justification of the possibility of processing containerized bulk cargoes at a marine terminal." *Vestnik gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 17.2 (2025): 208–215. DOI: 10.21821/2309-5180-2025-17-2-208-215.

7. Cherkin, E. A. "Managing the supply chain: best practice in Russia and internationally." *Transport Rossiyskoy Federatsii* 5(48) (2013): 52–54.

8. Zimin, A. V. "Agility increase of enterprise management by modern methods of mathematical modelling and data visualisation." *Bulletin of The South Ural State University Series "Computer Technologies, Automatic Control, Radio Electronics"* 15.1 (2015): 69–74.

9. Izotov, O. A. "Modeling of bulk container handling schemes at a marine terminal." *Vestnik gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 17.3 (2025): 331–339. DOI: 10.21821/2309-5180-2025-17-3-331-339.

10. Izotov, O. A., N. S. Polubotko and E. E. Marushkina. "Application of queuing theory in the organization of bulk cargo transshipment at a container terminal." *Vestnik gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 17.4 (2025): 493–501. DOI: 10.21821/2309-5180-2025-17-4-493-501.

11. Zabnenkov, V. S. "Kontseptual'nyy podkhod k sozdaniyu logisticheskogo tsentra v punktakh vzaimodeystviya zheleznodorozhnogo i vodnogo transporta." *Rechnoy transport (XXI vek)* 6(54) (2011): 64–69.

12. Kuznetsov, A. L., A. V. Kirichenko and A. D. Semenov. "Evaluating lead-time in complex supply chains by simulation technique." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 13.3 (2021): 372–383. DOI: 10.21821/2309-5180-2021-13-3-372-383.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Изотов Олег Альбертович —

доктор технических наук, доцент

ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала

С. О. Макарова»

198035, Российская Федерация, Санкт-Петербург,

ул. Двинская, 5/7

e-mail: iztv65@rambler.ru, kaf_pgt@gumrf.ru

Полуботко Никита Сергеевич —

аспирант

ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала

С. О. Макарова»

198035, Российская Федерация, Санкт-Петербург,

ул. Двинская, 5/7

e-mail: nipolubotko@inbox.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Izotov, Oleg A. —

Grand PhD in Technical Sciences, associate professor

Admiral Makarov State University of Maritime

and Inland Shipping

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

Russian Federation

e-mail: iztv65@rambler.ru, kaf_pgt@gumrf.ru

Polubotko, Nikita S. —

postgraduate student

Admiral Makarov State University of Maritime

and Inland Shipping

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

Russian Federation

e-mail: nipolubotko@inbox.ru

Статья поступила в редакцию: 16 декабря 2025 г.

Received: Dec. 16, 2025

EXPERIMENTAL STUDY OF A NEW TYPE OF HYDRODYNAMIC LOG

A. A. Antonov, A. V. Artemiev, V. A. Kutsenko

Maritime State University named after Admiral G. I. Nevelskoy,
Vladivostok, Russian Federation

This paper presents research on the development of a new type of ship speed measuring device based on microelectromechanical systems (MEMS). A design deficiency in the configuration proposed in the authors' earlier publications has been identified. Computer-based calculations demonstrated a significant error in determining vessel speed, caused by inaccurate measurement of static water pressure resulting from fluid flow around a cylindrical body. Further studies were carried out using modern software packages to evaluate errors in vessel speed measurement and to determine the optimal geometry of the log tube and the best locations for installing pressure sensors. Based on the results of numerical simulations, an improved design is proposed that reduces measurement error. Experimental testing of a prototype under real marine conditions confirmed the feasibility of measuring a vessel's relative speed using MEMS components. The model presented in this study eliminates many of the drawbacks characteristic of previous generations of hydrodynamic logs. The device has been significantly miniaturized, creating prospects for installation on both conventional vessels and small autonomous maritime craft. Key directions for further research are highlighted.

Keywords: microelectromechanical systems (MEMS), hydrodynamic log, relative speed sensor, pressure sensor, Bernoulli equation, dynamic pressure, static pressure, flow-induced pressure, navigation safety, marine instrumentation.

For citation:

Antonov, Alexander A., A. V. Artemiev and V. A. Kutsenko "Experimental study of a new type of hydrodynamic log." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 17.6 (2025): 68–76. DOI: 10.21821/2309-5180-2026-18-1-68-76.

УДК 629.5.05

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ГИДРОДИНАМИЧЕСКОГО ЛАГА НОВОГО ТИПА

А. А. Антонов, А. В. Артемьев, В. А. Куценко

Морской государственный университет имени адмирала Г. И. Невельского,
г. Владивосток, Российская Федерация

В работе выполнены исследования в области разработки судовых измерителей скорости нового типа, работающих на микроэлектромеханических элементах. Отмечается недостаток в конструкции, предложенной в ранних публикациях авторов. С помощью компьютерных расчетов доказано наличие существенной погрешности при вычислении скорости судна, которая обусловлена некорректным измерением статического давления воды из-за эффектов, возникающих при обтекании цилиндрического тела жидкостью. Выполнены исследования с использованием современных программных комплексов с целью оценки погрешностей измерения скорости судна, а также для определения оптимальной формы трубки лага и мест размещения датчиков давлений. На основе результатов компьютерного моделирования предложена конструкция, обеспечивающая меньшую погрешность измерения. Экспериментальная проверка макета нового лага выполнена в реальных морских условиях. Подтверждена возможность измерения относительной скорости судна с помощью микроэлектромеханических элементов. Предложенная в работе модель лишена многих недостатков, характерных для гидродинамических лагов прошлых поколений. Конструкция прибора уменьшена в разы, что в перспективе дает возможность устанавливать лаг как на классических типах судов, так и на малогабаритных морских автономных судах. Выделены ключевые направления дальнейших исследований.

Ключевые слова: микроэлектромеханические системы, гидродинамический лаг, измеритель относительной скорости, датчик давления, уравнение Бернулли, скоростной напор жидкости, статическое давление, динамическое давление, безопасность судоходства, морское приборостроение.

Для цитирования:

Антонов А. А. Экспериментальное исследование гидродинамического лага нового типа / А. А. Антонов, А. В. Артемьев, В. А. Куценко // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2025. — Т. 17. — № 6. — С. 68–76. DOI: 10.21821/2309-5180-2026-18-1-68-76. — EDN OAWPSN.

Введение (Introduction)

Современное развитие морского транспорта предъявляет повышенные требования к точности и надежности навигационного оборудования судов. Одним из важных элементов системы навигации на судне являются измерители скорости относительно воды и грунта, обеспечивающие точную оценку динамики движения, необходимую для безопасного судоходства.

В течение последних 15 лет появились новые электронные компоненты, такие как современные микроэлектромеханические системы (MEMS), характеризующиеся значительным прогрессом в повышении чувствительности и миниатюризации устройств [1]. Разработаны структуры и материалы, позволяющие создавать компактные и высокоэффективные датчики давлений, пригодные для высокоточных измерений в том числе в морских условиях. Параллельно развиваются новые вычислительные алгоритмы [2], обеспечивающие повышение точности работы навигационных систем путем использования технологий машинного обучения и компьютерного зрения. Все это способствует созданию новых приборов и улучшению характеристик уже используемых устройств¹ [3–4]. Исследование перспективных направлений развития судовых измерителей относительной скорости представляет собой одну из важных задач, направленных на повышение безопасности мореплавания и эффективности управления судном.

Целью данной работы является экспериментальное подтверждение возможности измерения относительной скорости судна с помощью высокоточных датчиков давления.

В задачи исследования входят:

- компьютерный расчет давления в области размещения датчиков при различных скоростях судна для конструкции, предложенной в [4], с оценкой погрешности вычисления скорости относительно воды;
- поиск оптимальной формы трубки лага и участков для размещения MEMS-элементов с целью уменьшения погрешности вычисления относительной скорости;
- апробация рабочего макета лага в реальных морских условиях.

Методы и материалы (Methods and Materials)

В публикации [4] выполнен обзор лагов, в основе работы которых заложены / используются принципы измерений статического и полного давления воды. Представлено перспективное направление развития судовых измерителей относительной скорости для морских автономных надводных судов (МАНС) и кораблей специального назначения, основанное на использовании микроэлектромеханических чувствительных элементов. Корпус гидродинамического лага нового типа представлен на рис. 1 [4]. В указанной публикации для измерения полного давления предлагалось использовать один датчик MS5837–30BA, применяемый на некоторых подводных аппаратах [5], расположенный по направлению движения судна по аналогии с отверстием приемника полного давления в конструкциях прошлых поколений и два таких же элемента для измерения статического давления, расположенных на противоположных (боковых) сторонах вертикальной трубки лага. Процесс обтекания несжимаемой жидкостью цилиндрического тела достаточно подробно исследован в [6] и [7] с различной точностью расчетов.

¹ Завод штурманских приборов. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://navydevices.ru/products/646-lag-lgt-1> (дата обращения: 15.09.2025).



Рис. 1. Корпус гидродинамического лага нового типа:
а — трубка лага в разрезе; б — внешний вид трубки лага

На рис. 2 показано изменение скорости жидкости в пространстве вблизи трубки. В случае обтекания морской водой трубки лага цилиндрической формы уравнение Бернулли упрощается следующим образом:

$$p + \frac{1}{2} \rho v^2 = \text{const} , \quad (1)$$

где p — давление жидкости; ρ — плотность морской воды; v — скорость жидкости.

Из уравнения видно, что давление p обратно пропорционально квадрату скорости v . Это означает, что в местах, где скорость жидкости максимальна, давление будет минимальным.

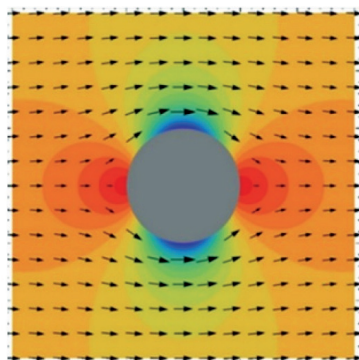


Рис. 2. Скорость жидкости и ее давление при обтекании цилиндрического тела

На рис. 2 видно, что скорость жидкости максимальна на участках около цилиндра, выделенных синим цветом. Соответственно давление воды на поверхность трубки в этих зонах будет низким. Именно в этих местах предлагалось размещать датчики статического давления на вертикальной трубке лага [4], в то время как датчик полного давления должен быть размещен в красной зоне (на рис. 2 слева).

Согласно [4] запишем

$$p_d = p_n - p_{ст} = \rho \frac{v^2}{2} , \quad (2)$$

где p_d — гидродинамическое давление; p_n — полное давление; $p_{ст}$ — статическое давление; v — относительная скорость судна.

Таким образом, точность измерения скорости судна с помощью гидродинамического лага определяется точностью измерений полного p_n и статического давлений $p_{ст}$, на основе которых вычисляется гидродинамическая составляющая.

С учетом ранее изложенного можно предположить, что предлагаемая в [4] цилиндрическая форма трубки лага со размещенными по бокам датчиками MS5837–30BA может давать существенно заниженные показатели статического давления при разгоне судна, что будет приводить к неточному расчету его скорости.

В морском приборостроении особое значение приобретает точное моделирование взаимодействия твердых тел с жидкостью. Современные компьютерные технологии предоставляют мощные инструменты для выполнения подобных расчетов. Среди наиболее популярных программных комплексов выделяются SolidWorks и COMSOL Multiphysics, каждый из которых обладает уникальными возможностями и преимуществами [8] для специалистов в области судостроения и морского приборостроения.

SolidWorks предоставляет широкий спектр инструментов для создания и анализа конструкций, включая модуль SolidWorks Flow Simulation [9], предназначенный специально для проведения гидравлического или аэродинамического анализа, позволяя пользователям выполнять задачи по анализу потоков жидкости вокруг объекта, оценке давления, скорости жидкости, а также по оптимизации конструкции для минимизации потерь энергии и повышения эффективности. Одним из ключевых преимуществ SolidWorks Flow Simulation является интеграция с основной системой автоматизированного проектирования (CAD).

COMSOL Multiphysics представляет собой мощную платформу для междисциплинарного моделирования, [10] которая поддерживает решение широкого спектра инженерных задач, включая гидродинамические расчеты, в числе которых решение уравнений Навье – Стокса для определения полей скоростей и давлений. Благодаря своей способности объединять различные физические явления в одной среде, COMSOL Multiphysics идеально подходит для комплексного анализа процессов, связанных с движением тел в морской воде.

Указанные достоинства программных комплексов оказали влияние на выбор данных платформ в качестве инструмента для исследования. На рис. 3 представлено распределение давления морской воды у основания цилиндрической трубки лага длиной 1 м, которое зависит от скоростного напора жидкости и скорости судна соответственно. Красными и синими точками на рисунке обозначены места расположения датчиков согласно конструкции [4].

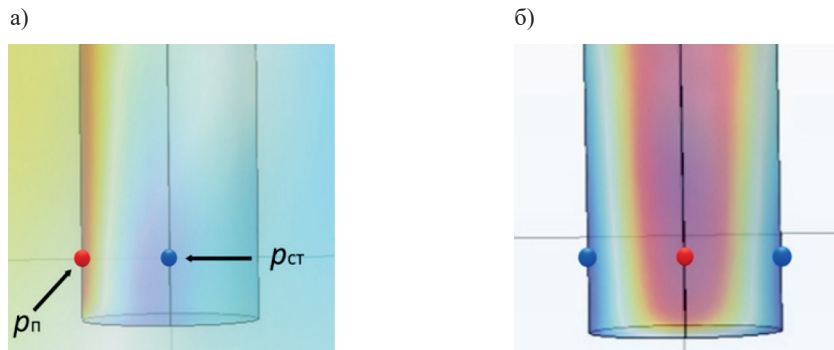


Рис. 3. Распределение давления морской воды на трубке лага в COMSOL Multiphysics:
а — вид сбоку; б — вид спереди

В целом картина давления морской воды на трубку, полученная в результате моделирования, соответствует уравнению Бернулли, приведенному ранее, однако важное значение имеют зависимости статического и полного давлений от скорости, представленные на рис. 4.

Кривая p_n на графике показывает нарастание полного давления в точке измерения с ростом скорости судна. При идеальных условиях измерений график $p_{ст}$ должен представлять собой прямую линию, где давление определяется глубиной погружения датчика и плотностью воды, однако программные расчеты подтверждают ранее описанные в работе предположения о том, что размещенные по бокам цилиндра чувствительные элементы будут занижать значения статического давления, что будет приводить к завышению скорости при ее расчете с использованием алгоритма. Например, при скорости 5 уз статическое давление будет занижено на 1015 Па, что даст расчетное значение скорости судна 5,75 уз (ошибка 0,75 уз). При 10 уз погрешность составит +2,45 уз, а при реальной скорости 20 уз достигнет +6,32 уз. Таким образом, предложенная в [4] модель имеет неоптимальную форму трубки и позиции для размещения датчиков $p_{ст}$.

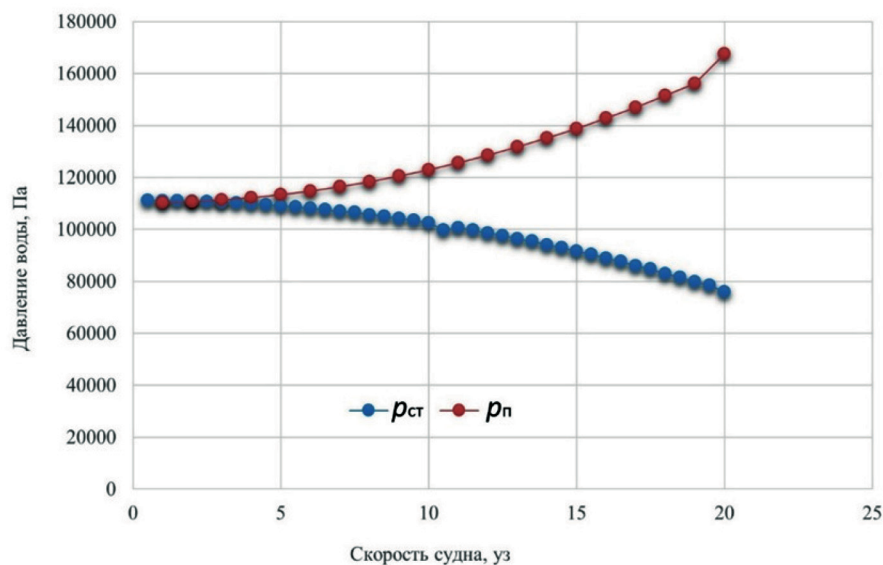


Рис. 4. Результаты расчета статического и полного давлений на скорости судна до 20 уз

В ходе дальнейших исследований с использованием программных комплексов SolidWorks и COMSOL Multiphysics было установлено, что эффекты обтекания жидкостью трубки лага, приводящие к заниженному значению измеряемого статического давления, выражены не так сильно при зауженной у основания форме трубки (рис. 5).



Рис. 5. Улучшенная модификация трубки лага

Датчик полного давления расположен внизу трубки на участке максимального напора воды. С целью определения оптимальных мест размещения чувствительных элементов, измеряющих статическое давление жидкости, проведен компьютерный расчет матрицы давлений на боковых поверхностях зауженной части корпуса лага (рис. 6) на скорости от 0,5 уз до 20 уз.



Рис. 6. Точки возможного размещения датчиков статического давления

Результаты расчетов $p_{ст}$ в программе SolidWorks для 18 точек боковой поверхности приведены на рис. 7.

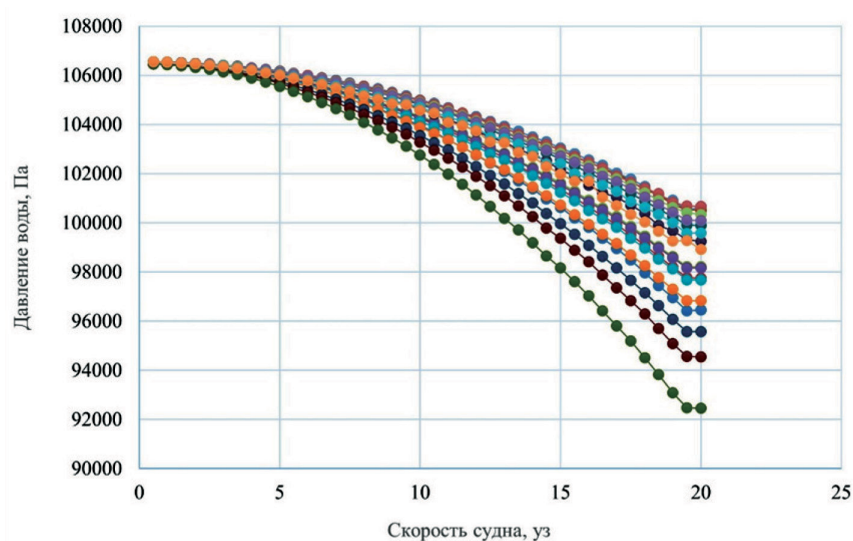


Рис. 7. Расчет давления на боковой поверхности трубки

Наилучший результат определяется верхним графиком с максимальным отклонением статистического давления в 9341 Па на скорости судна 20 уз. Итоговая модель нижней части трубки в программном комплексе COMSOL Multiphysics представлена на рис. 8 и 9.

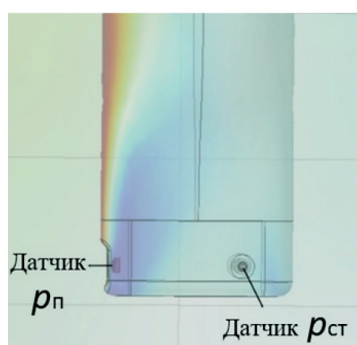


Рис. 8. Модель нижней части трубки лага в COMSOL Multiphysics (вид сбоку)

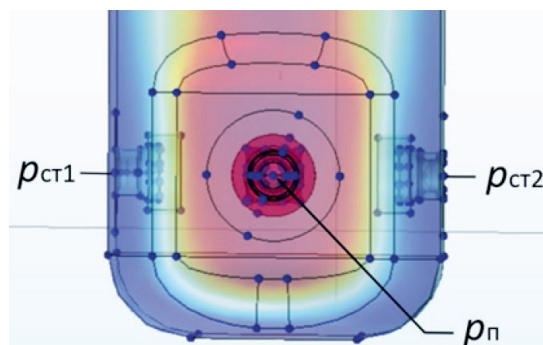


Рис. 9. Расположение датчиков MS5837–30BA (вид спереди)

Для достижения наименьшей погрешности измерения статического давления используются два элемента MS5837–30BA, расположенные симметрично по бокам трубки и смещенные на $\frac{3}{4}$ длины основания лага в сторону задней стенки.

Результаты (Results)

На основании компьютерных расчетов создана модель гидродинамического лага нового типа, работающая на трех датчиках давления. Итоговая модель лага приведена на рис. 10.

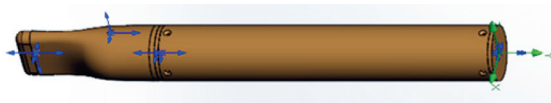


Рис. 10. Модель гидродинамического лага

Изменены форма трубки (по сравнению с [4]) и точки расположения MEMS-элементов. Электрическая схема, включающая блок питания, плату с микроконтроллером, приемопередатчик

Bluetooth (для макета), находится в корпусе лага. Испытания рабочего макета проходили на скорости до 6 уз. В процессе производилась запись информации, получаемой от гидродинамического лага и от глобальной навигационной спутниковой системы (ГЛОНАСС). Параллельно регистрировались значения времени, давления на датчиках, истинной скорости судна, курса движения, географических координат и характеристик сигналов спутников. Во время испытаний выполнялось минимум пять галсов. Количество видимых спутников ГНСС стабильно составляло не менее семи единиц, а коэффициент ухудшения точности позиционирования в горизонтальной плоскости (HDOP) не превышал 1,1, что подтверждает высокое качество определения местоположения и скорости по данным ГНСС. Полученные измерения приведены на рис. 11.

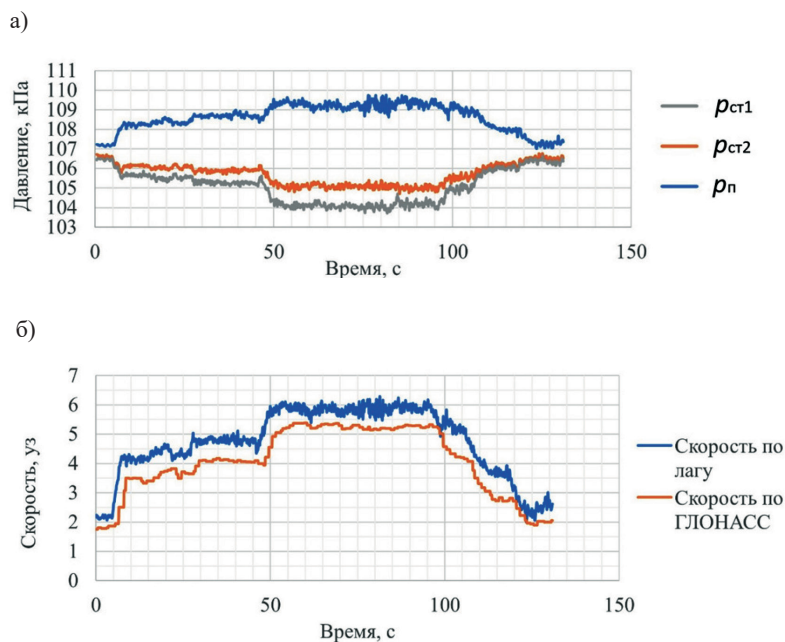


Рис. 11. Графики давлений (а) и скорости (б)

Из-за наличия течений, колебаний корпуса судна и, соответственно, трубки лага, показания $p_{ст1}$ и $p_{ст2}$ могут различаться [4] (рис. 11, а). Именно поэтому используется пара датчиков, а при расчете скорости судна из значения полного давления вычитается среднее значение $p_{ст}$. Эксперимент подтверждает результаты, полученные при компьютерном расчете в программных комплексах SolidWorks и COMSOL Multiphysics. Увеличение скорости потока жидкости снижает статическое давление, регистрируемое микроэлектромеханическими элементами, что приводит к появлению погрешности вычисления скорости микроконтроллером лага (рис. 11, б).

Графики скорости, полученные в ходе апробации лага, в целом подтверждают возможность измерения относительной скорости судна с помощью MEMS-элементов. Однако необходимы дополнительные исследования, направленные на снижение погрешности вычисления скорости судна программным способом.

Заключение (Conclusion)

В работе продолжены исследования [3] и [4]. Принимая во внимание результаты расчетов скоростей жидкости в процессе обтекания ею цилиндрического тела, а также величин давлений на его поверхности, приведенные в имеющихся научных работах, выполнен расчет давлений морской воды в точках размещения датчиков MS5837–30BA для модели лага, предложенной в [4]. Компьютерное моделирование показало, что измеряемые значения статической составляющей давления будут снижаться с ростом скорости судна, что приведет к существенному завышению относительной скорости при ее расчете микроконтроллером.

Компьютерные расчеты в SolidWorks и COMSOL Multiphysics позволили спроектировать оптимальную конструкцию корпуса лага, значительно улучшив характеристики прибора. Результатом явилась разработка новой модели судового измерителя относительной скорости. Проведенный в морских условиях эксперимент подтвердил работоспособность устройства. Предложенная модель лишена многих недостатков, характерных для гидродинамических лагов предыдущих поколений. Конструкция прибора уменьшена в разы, что даст возможность установки лага как на классических типах судов, так и на малогабаритных морских автономных судах. Основным ограничением на данном этапе является неточность измерения статического давления, которая дает погрешность вычисления скорости судна, превышающую предельно допустимую. Дальнейшие исследования должны быть направлены на ее снижение программным способом. Одним из перспективных направлений может быть разработка конструкции лага, способной дополнительно измерять угол дрейфа.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Han X. Advances in high-performance MEMS pressure sensors: design, fabrication, and packaging / X. Han M. Huang, Z. Wu, Y. Gao, Y. Xia, P. Yang, S. Fan, X. Lu, X. Yang, L. Liang, W. Su, L. Wang, Z. Cui, Y. Zhao, Z. Li, Z. Zhao, Z. Jiang // *Microsystems & Nanoengineering*. — 2023. — Vol. 9. — DOI: 10.1038/s41378-023-00620-1.
2. Geng S. A vision-based ship speed measurement method using deep learning / S. Geng, Z. Zhou, J. Zhao // *Proc. Int. Conf. Transport Inf. Saf. ICTIS*; ed. by organizing committee. — 2023. — Pp. 1753–1759.
3. Алхименко С. И. Схема построения современного гидродинамического лага / С. И. Алхименко, А. А. Аракелян, Т. Е. Жигалов, А. В. Артемьев // *Молодежь. Наука. Инновации*. — 2021. — Т. 1. — С. 41–45. — EDN LCCKWB.
4. Антонов А. А. Перспективы развития судовых относительных измерителей скорости / А. А. Антонов, А. В. Артемьев, О. О. Дробышева // *Морские исследования на Дальнем Востоке: сборник докладов VII научно-практической конференции, Владивосток, 19 ноября 2024 года*. — Владивосток: Морской государственный университет имени адмирала Г. И. Невельского, 2024. — С. 122–126. — EDN EXMNVR.
5. Ferrera M. AQUALOC: An underwater dataset for visual–inertial–pressure localization / M. Ferrera, V. Creuze, J. Moras, P. Trouvé-Peloux // *The International Journal of Robotics Research*. — 2019. — Vol. 38. — Is. 14. — Pp. 1549–1559. DOI: 10.1177/0278364919883346.
6. Yuce M. I. A Numerical Analysis of Fluid Flow Around Circular and Square Cylinders / M. I. Yuce, D. A. Kareem // *Journal AWWA*. — 2016. — Vol. 108. — Is. 10. — Pp. E546–E554. DOI: 10.5942/jawwa.2016.108.0141.
7. Jiang H. Large-eddy simulation of flow past a circular cylinder for Reynolds numbers 400 to 3900 / H. Jiang, L. Cheng // *Physics of Fluids*. — 2021. — Vol. 33. — Is. 3. — Pp. 034119. DOI: 10.1063/5.0041168.
8. COMSOL Multiphysics vs SolidWorks. [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://www.softwaresuggest.com/compare/comsol-multiphysics-vs-solidworks> (дата обращения: 20.03.2025).
9. Fialkova E. SolidWorks flow simulation software potential in hydrodynamic processes analysis for cone vortex emulsion / E. Fialkova, V. Baronov, A. Slobodin, K. Nechaev // *E3S Web of Conf.* — 2023. — Vol. 402. — Pp. 03007. DOI: 10.1051/e3sconf/202340203007.
10. Masna Computational analysis dynamics fluid of flow in dam using COMSOL Multiphysics / Masna, Tulus, Sawal // *Journal of Physics: Conference Series*. — 2023. — Vol. 2421. — Is. 1. — Pp. 012047. DOI: 10.1088/1742-6596/2421/1/012047.

REFERENCES

1. Han, X., Huang, M., Wu, Z., Gao, Y., Xia, Y., Yang, P., Fan, S., Lu, X., Yang, X., Liang, L., Su, W., Wang, L., Cui, Z., Zhao, Y., Li, Z., Zhao, L., & Jiang, Z. (2023). Advances in high-performance MEMS pressure sensors: design, fabrication, and packaging. *Microsystems & Nanoengineering*, 9. DOI: 10.1038/s41378-023-00620-1.
2. Geng, S.; Zhou, Z.; Zhao, J. A Vision-Based Ship Speed Measurement Method Using Deep Learning // *Proceedings of the 2023 7th International Conference on Transportation Information and Safety (ICTIS)*. — 2023. — Pp. 1753–1759.

3. Alkhimenko, S. I., A. A. Arakelyan, T. E. Zhigalov and A. V. Artem'ev. "Scheme of construction of modern hydrodynamic log." *Youth. Science. innovations* 1 (2021): 41–45.
4. Antonov, A. A., A. V. Artem'ev and O. O. Drobysheva. "Prospects for the development of ship relative speed measurement instruments." *Morskie issledovaniya na Dal'nem Vostoke: sbornik dokladov VII nauchno-prakticheskoy konferentsii, Vladivostok, 19 noyabrya 2024 goda*. Vladivostok: Morskoy gosudarstvennyy universitet imeni admirala G. I. Nevel'skogo, 2024: 122–126.
5. Ferrera, M., V. Creuze, J. Moras and P. Trouvé-Peloux. "AQUALOC: An underwater dataset for visual-inertial-pressure localization." *The International Journal of Robotics Research* 38.14 (2019): 1549–1559. DOI: 10.1177/0278364919883346.
6. Yuce, M. I. and D. A. Kareem. "A Numerical Analysis of Fluid Flow Around Circular and Square Cylinders." *Journal AWWA* 108.10 (2016): E546–E554. DOI: 10.5942/jawwa.2016.108.0141.
7. Jiang, H. and L. Cheng. "Large-eddy simulation of flow past a circular cylinder for Reynolds numbers 400 to 3900." *Physics of Fluids* 33.3 (2021): 034119. DOI: 10.1063/5.0041168.
8. COMSOL Multiphysics vs SolidWorks. Web. 20 March 2025 <<https://www.softwaresuggest.com/compare/comsol-multiphysics-vs-solidworks>>.
9. Fialkova, E., V. Baronov, A. Slobodin and K. Nechaev. "SolidWorks flow simulation software potential in hydrodynamic processes analysis for cone vortex emulsion." *E3S Web of Conf.* 402 (2023): 03007. DOI: 10.1051/e3sconf/202340203007.
10. Masna, Tulus and Sawal. "Computational analysis dynamics fluid of flow in dam using COMSOL Multiphysics." *Journal of Physics: Conference Series* 2421.1 (2023): 012047. DOI: 10.1088/1742–6596/2421/1/012047.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Антонов Александр Александрович —
старший преподаватель кафедры
радиоэлектроники и радиосвязи
ФГБОУ ВО «МГУ им. адм. Г. И. Невельского»
690003, Российская Федерация, г. Владивосток,
ул. Верхнепортовая, 50а
e-mail: Antonov@msun.ru

Артемьев Андрей Владимирович —
кандидат технических наук, доцент,
начальник лаборатории автономного судовождения
ФГБОУ ВО «МГУ им. адм. Г. И. Невельского»
690003, Российская Федерация, г. Владивосток,
ул. Верхнепортовая, 50а
e-mail: Artemyev@msun.ru

Куценко Владислав Александрович —
инженер лаборатории автономного судовождения
ФГБОУ ВО «МГУ им. адм. Г. И. Невельского»
690003, Российская Федерация, г. Владивосток,
ул. Верхнепортовая, 50а
e-mail: Vladislavkucenkorus@gmail.com

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Alexander A. Antonov —
senior lecturer at the department of radioelectronics
and radiocommunications
Admiral Nevelskoy Maritime State University
50a, Verkhneportovaya St., Vladivostok, 690003,
Russian Federation
e-mail: Antonov@msun.ru

Andrey V. Artemyev —
PhD in Technical Sciences, associate professor,
head of autonomous ship navigation laboratory,
Admiral Nevelskoy Maritime State University
50a, Verkhneportovaya St., Vladivostok, 690003,
Russian Federation
e-mail: Artemyev@msun.ru

Vladislav A. Kutsenko —
Engineer at the autonomous ship navigation laboratory
Admiral Nevelskoy Maritime State University
50a, Verkhneportovaya St., Vladivostok, 690003,
Russian Federation
e-mail: Vladislavkucenkorus@gmail.com

*Статья поступила в редакцию: 23 октября 2025 г.
Received: Oct. 23, 2025.*

ON THE ISSUE OF DETERMINING THE ESTIMATED NAVIGABLE LEVEL ON INLAND WATERWAYS

S. A. Ageev, V. V. Karetnikov, S. V. Rudykh

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

This paper examines the issue of determining a reliable estimated navigable level (ENL) for inland waterways of regional significance. The accurate determination of the actual ENL on the inland waterways of the Russian Federation is directly linked to ensuring navigation safety. The ENL establishes a regulatory parameter essential for navigators, enabling the safe transit of vessels through movable or fixed navigable bridge spans, and the vertical clearance of such spans is established on the basis of the ENL. An incorrect determination of the lower boundary of the ENL may result in either a reduction or an increase in the actual vertical clearance: in the former case, certain vessels may be denied passage through movable or fixed navigable bridge spans; in the latter case, if the actual vertical clearance is lower than the prescribed value, a navigational accident may occur during vessel transit within the bridge span. The precise determination of the ENL is particularly important for waterways of regional significance, some of which are located within large urban areas with developed river and canal systems supporting regular navigation. Within the city limits of St. Petersburg, for example, there are 66 bridges with navigable spans permitting vessel transit, and vessels passing through these spans frequently operate with minimal vertical clearance margins; therefore, it is essential to determine the ENL accurately for each individual bridge. Only such an approach ensures the required level of navigation safety while maintaining an adequate level of waterway operational efficiency through the operation of vessels with maximum permissible dimensions on regional waterways where bridges with navigable spans are located.

Keywords: inland waterways, estimated navigable level, navigable bridge span, navigation safety, permissible draught, high-precision positioning systems, fairway width, navigation and hydrographic support, vertical clearance, bridge alignment, vessel manoeuvrability, human factor.

For citation:

Ageev, Sergei A., V. V. Karetnikov and S. V. Rudykh. "On the issue of determining the estimated navigable level on inland waterways." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admiral S. O. Makarova* 18.1 (2026): 77–83. DOI: 10.21821/2309-5180-2026-18-1-77-83.

УДК 656.62; 629.122

К ВОПРОСУ ОПРЕДЕЛЕНИЯ РАСЧЕТНОГО СУДОХОДНОГО УРОВНЯ НА ВНУТРЕННИХ ВОДНЫХ ПУТЯХ

С. А. Агеев, В. В. Каретников, С. В. Рудых

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

В работе рассмотрен актуальный для внутренних водных путей регионального значения вопрос по определению достоверного расчетного судоходного уровня. Точное определение фактического значения расчетного судоходного уровня на внутренних водных путях Российской Федерации непосредственно связано с процессом обеспечения безопасности судоходства. Отмечается, что расчетный судоходный уровень определяет важный для судоводителя норматив, позволяющий осуществить безопасный проход судов через наведенные или неразводные судоходные пролеты мостов. Констатируется, что именно от расчетного судоходного уровня устанавливается надводный габарит судоходных пролетов мостов. Приведены обоснования того, что в случае, если нижняя граница будет определена с ошибкой, то это приведет к уменьшению или увеличению фактического значения надводного габарита. В первом случае это может привести к тому, что некоторым судам проход в наведенный или неразводной судоходный пролет моста будет запрещен. Во-втором случае, если фактическое значение надводного габарита будет меньше нормированного, то при движении судна в судоходном пролете моста может произойти транспортное происшествие.

Подчеркивается, что точное определение расчетного судоходного уровня является особенно актуальным на путях регионального значения, часть которых расположена в черте крупных городов, имеющих развитую систему рек и каналов, на которых осуществляется регулярное судоходство. Обращается внимание на то, что в черте г. Санкт-Петербурга находится 66 мостов, проход под которыми разрешен в судоходные пролеты, причем суда, проходящие в такие пролеты, имеют минимальный запас по высоте и в этом случае крайне важно точно определить расчетный судоходный уровень для каждого из мостов. Приведены доказательства того, что только такой подход позволит обеспечить необходимый уровень безопасности судоходства в совокупности с достаточным уровнем эффективности использования водного пути, обусловленной возможностью эксплуатации судов, обладающих максимально возможными габаритами на путях регионального значения, где расположены мосты, под которыми судам разрешен проход.

Ключевые слова: внутренние водные пути, расчетный судоходный уровень, судоходный пролет моста, безопасность судоходства, допустимая осадка, высокоточные системы позиционирования, ширина судового хода, навигационно-гидрографическое обеспечение, высотный габарит, створ моста, управляемость судна, человеческий фактор.

Для цитирования:

Агеев С. А. К вопросу определения расчетного судоходного уровня на внутренних водных путях / С. А. Агеев, В. В. Каретников, С. В. Рудых // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2026. — Т. 18. — № 1. — С. 77–83. DOI: 10.21821/2309-5180-2026-18-1-77-83. — EDN PBFQVB.

Введение (Introduction)

В Российской Федерации протяженность внутренних водных путей (ВВП) составляет более 100 тыс. км. Для навигационно-гидрографического обеспечения на такой значительной протяженности применяется современное гидрографическое оборудование и высокоточные системы позиционирования, подробно рассмотренные в публикациях [1, 2]. Классификация ВВП учитывает условия, в соответствии с которыми обеспечивается безопасность судоходства, устанавливаются габариты судовых ходов, параметры расчетных судов и др.

Минимальная глубина судового хода на ВВП определяет допустимую осадку проходящих судов, минимальной шириной судового хода и радиусом его закругления определяются ширина и длина проходящих судов и составов, а также возможность безопасного двухстороннего или только одностороннего движения на участке пути. Основным сдерживающим фактором для судоходства является высотный габарит, который ограничивает высоту проходящих судов. При этом необходимо учитывать также опережающие темпы развития автотранспортной и железнодорожной отрасли, значительно превосходящие другие виды транспорта в Российской Федерации, которые требуют строительства мостовых переходов через ВВП, что, в свою очередь, существенным образом может осложнить непростые судоходные условия на ВВП.

Таким образом, мосты и габариты их судоходных пролетов могут значительно ограничивать размерения судов, которые могут безопасно эксплуатироваться в данном районе. Кроме того, мосты лимитируют проходную высоту судов, уменьшают ширину судового хода, нарушают естественный режим рек, стесняя русло, они могут вызывать подпор, приводить к изменению скорости и направления течения на участке как в процессе строительства, так и на этапе эксплуатации мостов, что негативным образом отражается на судоходных условиях в акваториях ВВП. Такое негативное влияние может отражаться на управляемости судов как в створе моста, так и на прилегающих к нему участках. Кроме того, не следует забывать об ограничении прямой видимости с мостика судна, запрете якорной стоянки в охранной зоне сооружения и др. Естественно, что все эти факторы оказывают непосредственное действие на процесс обеспечения безопасности судоходства в бассейне ВВП.

При прохождении мостов с низкими габаритами судоходных пролетов на судоводителя ложится дополнительная психоэмоциональная нагрузка, связанная с опасностью навала судна на опоры моста, опасением зацепить надстройкой судна низ нависающей конструкции судоходного пролета, что способствует появлению усталости и может создать предпосылки к аварийному происшествию под влиянием человеческого фактора [3].

Статистика аварийных происшествий на ВВП РФ свидетельствует о том, что несмотря на тенденцию снижения аварийности на ВВП транспортные происшествия в районах, где расположены судоходные пролеты мостов, происходят достаточно часто. Поэтому вопросам обеспечения безопасности при проходе мостов посвящены работы как отечественных [4–6], так и зарубежных специалистов [7–9]. На некоторых ВВП, например на реке Неве, для обеспечения безопасности плавания в районе Санкт-Петербургских мостов привлекают лоцмана [10].

Навигационные знаки, предназначенные для обеспечения безопасности судоходства в судоходных пролетах мостов, такие как соблюдение надводных габаритов, указатели высоты подмостового габарита и кромок судового хода в судоходном пролете моста, устанавливаются применительно к расчетному судоходному уровню (РСУ). РСУ представляет собой один из высоких уровней воды, применительно к которому устанавливают габариты судоходных пролетов мостов.

Целью данной работы является рассмотрение существующих подходов управления РСУ, определение наиболее предпочтительного метода для ВВП регионального значения, т. е. анализ применяемых на практике методов определения РСУ.

Методы и материалы (Methods and Materials)

Для того чтобы уменьшить негативное влияние мостовых переходов на судоходные условия, был разработан и принят ГОСТ 26775–97 «Габариты подмостовые судоходных пролетов мостов на внутренних водных путях» (взамен ГОСТ 26775–85, введ. в действ. с 1 января 1998 г.), устанавливающий нормы и технические требования к тем частям конструкции мостов, которые ограничивают габариты судовых ходов. В соответствии с указанным ГОСТом подмостовой габарит судоходных пролетов мостов устанавливается от РСУ.

В настоящее время не все мосты, расположенные на ВВП РФ, соответствуют ГОСТу 26775–97, особенно часто такое несоответствие встречается на ВВП регионального значения. В большинстве случаев это вызвано тем, что эти мосты были построены до разработки указанного нормативного документа. Следует отметить, что на ВВП РЗ такие мосты были построены еще до внедрения термина ВВП РЗ и внесения изменений в КВВТ, позволяющих относить к ВВП РЗ ВВП поверхностные водные объекты, пригодные для судоходства, но которые при этом не относятся к федеральным ВВП. Тем не менее несмотря на то, что мосты построены до начала действия данного ГОСТа, установка и содержание навигационных знаков на них обязательны. Такая обязанность возложена на владельцев мостов в соответствии с Кодексом внутреннего водного транспорта (КВВТ). Однако на некоторых ВВП регионального значения, например ВВП регионального значения Санкт-Петербурга, навигационные знаки установлены с нарушением действующих нормативных документов [11], а также не определены значения РСУ для 66 мостов.

РСУ определяется расчетным путем с применением методик, основанных на статистических методах анализа имеющейся за многолетний период гидрологической информации. Применение таких методик обусловлено тем, что на процесс формирования уровня воды оказывают влияние слишком большое количество факторов, основная часть которых не поддается точному учету, а также благодаря тому, что связи между значениями уровня и климатическими параметрами нечеткие и нелинейные. Поэтому колебания уровня воды, происходящие на ВВП, в том числе и в районе мостовых переходов, приходится рассматривать как стохастические (случайные) процессы (СП).

СП представляют параметрическое семейство случайных величин (СВ) $\{X(t)\}_{t \in T}$, где в качестве параметра t в данном случае выступает время, которое может принимать бесконечное множество значений T . Сечение СП при фиксированном значении аргумента t имеет свой закон распределения, являющийся исчерпывающей характеристикой СВ. Известно, что интегральная функция распределения $F(x)$ СВ X выражает вероятность того, что она примет значение меньше некоторого числа x , т. е.

$$F(x) = P\{X < x\}, \quad (1)$$

где $F(x)$ — функция распределения СВ; X — СВ; x — значение СВ.

При определении РСУ необходимо установить вероятность, того, что СВ X превысит некоторое число x . Для этого вместо интегральной функции распределения необходимо использовать функцию обеспеченности:

$$P(x) = 1 - F(x) = P\{X > x\}, \quad (2)$$

где $P(x)$ — функция обеспеченности СВ.

Функция обеспеченности показывает вероятность превышения рассматриваемого значения РСУ.

Формулу (2) следует использовать тогда, когда известен закон распределения СВ, однако при определении РСУ в подавляющем большинстве случаев можно получить лишь некоторое достаточно приближенное представление об обеспеченности уровней. Одним из вариантов получения таких приближенных представлений является построение эмпирического графика по имеющимся в наличии данным многолетних наблюдений.

Для построения эмпирической кривой обеспеченности уровней воды для участков свободных (нешлюзованных) рек вначале определяется расчетная продолжительность физической навигации T , сут:

$$T = \frac{\sum_{i=1}^{i=n} T_i}{n}, \quad (3)$$

где T_i — продолжительность навигационного периода, отсчитываемого с момента очищения ВВП ото льда до начала наступления устойчивого ледообразования; $n \geq 10$ — количество лет наблюдений за уровнем воды.

Затем определяется допускаемая продолжительность времени стояния уровней воды выше РСУ t , сут, по формуле

$$t = \frac{KT}{100}, \quad (4)$$

где K — коэффициент допускаемого снижения продолжительности физической навигации, зависящий от класса водного пути.

Таким образом, предложенный подход позволяет достаточно точно определить фактическое значение РСУ. Используя выражения (1)–(4), можно получить исчерпывающую картину РСУ.

Результаты (Results)

В результате можно получить зависимость хода уровней воды в период прохождения паводков или половодий за все годы наблюдений $H = f(t)$ и по ним определить уровни воды H_t , превышаемые более высокими уровнями в течение t , сут (рис. 1).

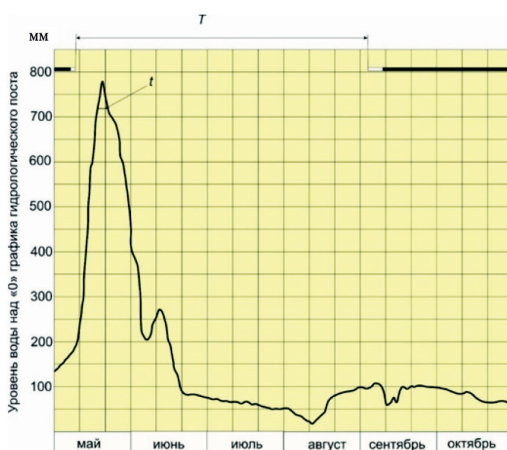


Рис. 1. Зависимость колебаний уровня воды от времени года [4]

Полученные значения уровней H_i ранжируются в порядке убывания, представляя собой последовательность СВ.

Далее определяется эмпирическая вероятность превышения P , %, по формуле

$$P = \frac{m}{n+1} 100, \quad (5)$$

где m — порядковый номер уровня воды в ранжированном по убыванию ряду; n — общее число членов рассматриваемого ряда.

На основе полученных значений H_i и P строят график $H_i f(P)$, представляющий собой аналитическую кривую, являющуюся некоторой аппроксимацией распределения СВ, по которому можно определить отметку РСУ в зависимости от необходимой расчетной вероятности превышения P_d , % (рис. 2).

В соответствии с ГОСТом 26775–97, $P_d = 2$ — для водного пути первого класса, $P_d = 3$ — для водного пути второго класса, $P_d = 4$ — для водных путей третьего, шестого и седьмого классов, $P_d = 5$ — для водных путей четвертого и пятого классов.

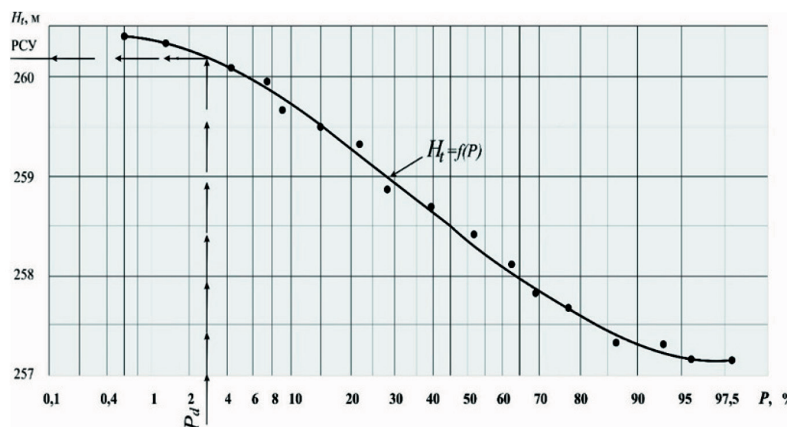


Рис. 2. Пример определения РСУ по эмпирической кривой обеспеченности уровня воды [4]

Определение РСУ на ВВП регионального значения г. Санкт-Петербурга осложняется отсутствием достаточного ряда наблюдений в створе мостовых переходов. Для решения данной задачи возможно применение нескольких способов, но, на наш взгляд, наиболее рациональными являются следующие два варианта.

Первый вариант — определение РСУ с помощью приведения имеющихся в наличии краткосрочных наблюдений к многолетнему периоду с использованием имеющегося ряда наблюдений за уровнями воды на так называемых *реках-аналогах*.

Второй вариант — определение отметки РСУ для створа опорного гидрологического поста с последующим переносом определенного РСУ с опорного гидрологического поста на створ моста, используя предварительно построенный график связи уровней воды между гидрологическим постом и створом моста. При этом для построения графика связи необходимо выполнить серию синхронных наблюдений за уровнями на опорном гидрологическом посту и в створе моста при соответствующих уровнях воды.

Заключение (Conclusion)

Необходимо проводить системные наблюдения за фактическими значениями уровня воды вне зависимости от того, какой способ для определения РСУ применяется. Как и для любого другого стохастического процесса, каким является процесс колебания уровня воды, основным материалом для изучения служит его реализация. Естественно, что наиболее хорошие результаты для определения РСУ можно получить, располагая только достаточно большим рядом наблюдений.

Для ВВП регионального значения г. Санкт-Петербурга, по-видимому, наиболее предпочтительным вариантом определения РСУ является определение отметки РСУ для створа опорного гидрологического поста с последующим его переносом на створы мостовых переходов с помощью графиков связи уровней воды, поскольку вариант определения РСУ, связанный с приведением краткосрочных наблюдений к многолетнему периоду с помощью рек-аналогов, имеющих достаточный ряд гидрологических наблюдений, требует правильного учета и высокой степени корреляции значительного количества гидрологических характеристик.

Корректный подбор рек-аналогов для водных путей, расположенных в дельте р. Невы, осложняется специфическими особенностями ее гидрологического режима, зарегулированностью Ладожским озером, нюансами распределения расходов воды по рукавам, подверженности изменения горизонта водной поверхности под влиянием сгонно-нагонных явлений со стороны Невской губы и Финского залива и др.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Каретников В. В. Использование современных телекоммуникационных средств для навигационно-гидрографического обеспечения судоходства на внутренних водных путях России / В. В. Каретников, С. В. Рудых, М. А. Петров // Морская радиоэлектроника. — 2016. — № 3(57). — С. 12–15. — EDN WWSYZD.
2. Миляков Д. Ф. Первый опыт использования высокоточных систем местоопределения на внутренних водных путях России / Д. Ф. Миляков, С. В. Рудых, И. В. Пашенко, В. В. Козлов // Морская радиоэлектроника. — 2018. — № 3(65). — С. 14–17. — EDN YUJUBV.
3. Каретников В. В. Исследование влияния усталости судоводителя на процесс обеспечения безопасности судоходства / В. В. Каретников, С. В. Козик, И. А. Соколова // Вестник государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2017. — Т. 9. — № 2. — С. 272–279. DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-2-272-279. — EDN YLFWJD.
4. Павлушкин С. В. Повышение безопасности судоходных условий на участках рек с мостовыми переходами (на примере рек Обского бассейна): диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук; специальность: специальность 05.22.17 «Водные пути сообщения и гидрография» / С. В. Павлушкин. — Новосибирск: Новосиб. гос. акад. вод. трансп., 2012. — EDN QFUXPP.
5. Зайков В. И. Повышение безопасности при движении судов под мостами / В. И. Зайков, М. А. Коловцов // Транспорт Российской Федерации. — 2006. — № 5(5). — С. 39–40. — EDN JXCMLH.
6. Андреев Ю. Г. Способ выбора допустимой скорости прохода судов под мостами / Ю. Г. Андреев // Журнал университета водных коммуникаций. — 2012. — № 3. — С. 171–175. — EDN PCREOH.
7. Jian G. Probability Analysis of Aberrant Ship Collision with Sea-Crossing Bridges Considering Wind and Current / G. Jian, Q. Liqi, W. Jiyi, W. Jinhui // Journal of Bridge Engineering. — 2022. — Vol. 27. — Is. 11. — Pp. 04022108. DOI: 10.1061/(ASCE)BE.1943-5592.0001958.
8. Pedersen P. T. Design of bridges against ship collisions / P. T. Pedersen, J. Chen, L. Zhu // Marine Structures. — 2020. — Vol. 74. — Pp. 102810. DOI: 10.1016/j.marstruc.2020.102810.
9. Mansuy M. Simulation Study to Assess the Maximum Dimensions of Inland Ships on the River Seine in Paris / M. Mansuy, M. Candries, K. Elout, S. Page // Proceedings of PIANC Smart Rivers 2022 — Springer Nature Singapore, 2023. — Pp. 186–200.
10. Биргер А. Я. Вопросы организации лоцманской проводки судов (составов) через разводные пролёты мостов Санкт-Петербурга во время их разводки / А. Я. Биргер, В. В. Каретников // Вестник государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2023. — Т. 15. — № 4. — С. 557–566. DOI: 10.21821/2309-5180-2023-15-4-557-566. — EDN WYVEOU.
11. Агеев С. А. Обеспечение безопасности судоходства на внутренних водных путях регионального значения Санкт-Петербурга / С. А. Агеев, В. В. Каретников, С. В. Рудых // Вестник государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2024. — Т. 16. — № 3. — С. 370–378. DOI: 10.21821/2309-5180-2024-16-3-370-378. — EDN KLYYYX.

REFERENCES

1. Karetnikov, V. V., S. V. Rudykh and M. A. Petrov. “The use of modern telecommunication equipments for shipping condition on the inland waterways of the Russian Federation.” *Marine Radioelectronics* 3(57) (2016): 12–15.

2. Milyakov, D. F., S. V. Rudykh, I. V. Paschenko and V. V. Kozlov. "First experience of use of high-precise positioning systems for inland waters." *Marine Radioelectronics* 3(65) (2018): 14–17.
3. Karetnikov, V. V., S. V. Kozik and I. A. Sokolova. "Influence of fatigue skipper on ensuring security of navigation." *Vestnik gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 9.2 (2017): 272–279. DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-2-272-279.
4. Pavlushkin, S. V. *Povyshenie bezopasnosti sudokhodnykh usloviy na uchastkakh rek s mostovymi perekhodami (na primere rek Obskogo basseyna)*. PhD diss. Novosibirsk, 2012.
5. Zaykov, V. I. and M. A. Kolosov. "Povyshenie bezopasnosti pri dvizhenii sudov pod mostami." *Transport Rossiyskoy Federatsii* 5(5) (2006): 39–40.
6. Andreev, Yu. G. "Sposob vybora dopustimoy skorosti prokhoda sudov pod mostami." *Zhurnal universiteta vodnykh kommunikatsiy* 3 (2012): 171–175.
7. Jian, G., Q. Liqi, W. Jiyi and W. Jinhui. "Probability Analysis of Aberrant Ship Collision with Sea-Crossing Bridges Considering Wind and Current." *Journal of Bridge Engineering* 27.11 (2022): 04022108. DOI: 10.1061/(ASCE)BE.1943-5592.0001958.
8. Pedersen, P. T., J. Chen and L. Zhu. "Design of bridges against ship collisions." *Marine Structures* 74 (2020): 102810. DOI: 10.1016/j.marstruc.2020.102810.
9. Mansuy, M., M. Candries, K. Eloit and S. Page. "Simulation Study to Assess the Maximum Dimensions of Inland Ships on the River Seine in Paris." *Proceedings of PIANC Smart Rivers 2022*. Springer Nature Singapore, 2023: 186–200.
10. Birger, A. Ya. and V. V. Karetnikov. "Issues of organizing vessels pilotage through the drawbridges spans in St. Petersburg." *Vestnik gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 15.4 (2023): 557–566. DOI: 10.21821/2309-5180-2023-15-4-557-566.
11. Ageev, S. A., V. V. Karetnikov and S. V. Rudykh. "Ensuring the safety of navigation on the inland waterways of regional importance in Saint Petersburg." *Vestnik gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 16.3 (2024): 370–378. DOI: 10.21821/2309-5180-2024-16-3-370-378.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Агеев Сергей Александрович —
доктор технических наук,
старший научный сотрудник,
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала
С. О. Макарова»
198035, Российская Федерация, Санкт-Петербург,
ул. Двинская, 5/7
e-mail: ageevsa@gumrf.ru

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

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

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Ageev, Sergei A. —
Grand PhD in Technical Sciences,
Senior Researcher
Admiral Makarov State University of Maritime
and Inland Shipping
5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg 198035,
Russian Federation
e-mail: ageevsa@gumrf.ru

Karetnikov, Vladimir V. —
Grand PhD in Technical Sciences, Professor
Admiral Makarov State University of Maritime
and Inland Shipping
5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg 198035,
Russian Federation
e-mail: karetnikovvv@gumrf.ru

Rudykh, Sergei V. —
Grand PhD in Technical Sciences, Associate Professor
Admiral Makarov State University of Maritime
and Inland Shipping
5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg 198035,
Russian Federation
e-mail: rudyhsv@gumrf.ru

Статья поступила в редакцию 18 декабря 2025 г.
Received: Dec. 18, 2025.

ТЕХНОЛОГИЯ СУДОСТРОЕНИЯ, СУДОРЕМОНТА И ОРГАНИЗАЦИЯ СУДОСТРОИТЕЛЬНОГО ПРОИЗВОДСТВА

DOI: 10.21821/2309-5180-2026-18-1-84-97

EDN VORNOH

ABOUT POSSIBILITY OF USING THE METHOD OF DIESEL CRANKING WITH EXTERNAL POWER SOURCE TO EVALUATE THE FRICTION OF PISTON RINGS

Y. N. Tsvetkov¹, D. O. Prokoshev², A. V. Mil'rat¹

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

² Limited Liability Company «Scientific-Production Company «Energy Movement»»,
St. Petersburg, Russian Federation

This study investigates the applicability of diesel cranking with an external power source for evaluating piston ring friction. Experiments were conducted on an air-cooled 2Ch10.5/12 diesel engine with a nominal power of 22 kW. The temperatures of the motor oil in the crankcase and of the ambient air were maintained constant at 85 ± 1 °C and 30 ± 1 °C, respectively. Mechanical losses were evaluated by two methods: 1) diesel cranking with an external power source and 2) comparison of indicated and effective powers at 30 % of nominal engine load. Mineral oils I-20A, MS-20, as well as their mixtures, were used as motor oils during testing. Mechanical losses determined by diesel cranking with an electric motor were approximately 16 % lower than those determined by comparison of indicated and effective powers. Assuming that the major fraction of the reduction in mechanical losses is caused by a lower force pressing the piston rings against the cylinder wall, the friction coefficients of the piston rings were calculated. The obtained friction coefficient values exceeded those reported in scientific literature by more than five times. This indicates that the change in piston ring friction is not the main cause of the reduction in mechanical losses during the transition from motor operation to diesel cranking. Therefore, piston ring friction cannot be determined by comparing mechanical losses obtained in cranking and motor regimes. An analysis of the causes of the reduction in mechanical losses during the transition from motor operation to diesel cranking was carried out.

Keywords: diesel engine, mechanical losses, diesel cranking, piston rings, cylinder, friction, boundary lubrication, hydrodynamic lubrication

For citation:

Tsvetkov, Yuriy N., D. O. Prokoshev and A. V. Mil'rat. "About possibility of using the method of diesel cranking with external power source to evaluate the friction of piston rings." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 18.1 (2026): 84–97. DOI: 10.21821/2309-5180-2026-18-1-84-97.

УДК 621.891

ВОЗМОЖНОСТЬ ПРИМЕНЕНИЯ МЕТОДА ИСПЫТАНИЙ ДИЗЕЛЕЙ ПРОВОРАЧИВАНИЕМ КОЛЕНЧАТОГО ВАЛА ОТ ПОСТОРОННЕГО ИСТОЧНИКА ЭНЕРГИИ ДЛЯ ОЦЕНКИ ТРЕНИЯ ПОРШНЕВЫХ КОЛЕЦ

Ю. Н. Цветков¹, Д. О. Прокошев², А. В. Мильрат¹

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

² ООО «НПК «Энергодвижение»», Санкт-Петербург, Российская Федерация

Проведены эксперименты на дизельном двигателе 2Ч10,5/12 воздушного охлаждения номинальной мощностью 22 кВт. Температуры моторного масла в картере и окружающего воздуха поддерживались посто-

янными и равными, соответственно, 85 ± 1 и 30 ± 1 °С. Механические потери определялись методом проворачивания коленчатого вала дизеля с помощью постороннего источника энергии (без подачи топлива) и методом сравнения индикаторной и эффективной мощностей. В качестве моторных применялись минеральные масла И-20А и МС-20, а также композиции, составленные из смеси указанных масел. Оказалось, что мощность механических потерь, определенная методом проворачивания коленчатого вала с помощью электродвигателя, примерно на 16 % ниже мощности потерь при испытании дизеля в моторном режиме (на 30 % от номинальной мощности), т. е. методом сравнения индикаторной и эффективной мощностей. Исходя из того, что основная доля снижения механических потерь обусловлена меньшим давлением прижатия колец к стенке цилиндра, были рассчитаны коэффициенты трения колец. Полученные значения коэффициентов трения более чем в 5 раз превышают значения коэффициентов трения, имеющиеся в научной литературе, что свидетельствует о том, что изменение трения поршневых колец не является главной причиной снижения мощности механических потерь при переходе от моторного режима испытаний дизеля к режиму проворачивания коленчатого вала, поэтому трение поршневых колец невозможно оценить сопоставлением значений мощности потерь, полученных методом проворачивания коленчатого вала дизеля (без подачи топлива) и методом сравнения индикаторной и эффективной мощностей. Проведен анализ причин снижения мощности механических потерь при переходе от моторного режима испытаний к режиму проворачивания коленчатого вала.

Ключевые слова: дизельный двигатель, проворачивание коленвала электродвигателем, механические потери, поршневое кольцо, цилиндр, трение, граничная смазка, гидродинамическая смазка.

Для цитирования:

Цветков Ю. Н. Возможность применения метода испытаний дизелей проворачиванием коленчатого вала от постороннего источника энергии для оценки трения поршневых колец / Ю. Н. Цветков, Д. О. Прокошев, А. В. Мильрат // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2026. — Т. 18. — № 1. — С. 84–97. DOI: 10.21821/2309-5180-2026-18-1-84-97. — EDN VORNOH.

Введение (Introduction)

Судовые дизели имеют значительный резерв для снижения потерь на трение и уменьшения количества используемого топлива, являющегося одним из определяющих факторов энергоэкологической эффективности судовой энергетической установки [1]. Практически все потери на трение в ДВС приходятся на следующие узлы: цилиндропоршковую группу, подшипники коленчатого вала и механизм газораспределения [2]. Трибосопряжения указанных узлов работают при различных нагрузках, температурах и режимах смазки и определить потери на трение в разных узлах по отдельности является очень сложной задачей. Даже в одном сопряжении не поддерживается постоянно один и тот же режим смазки: в зависимости от момента времени может реализовываться режим жидкостной, граничной или смешанной смазки. Типичным примером является пара: *втулка цилиндра – поршневое кольцо*, износ которой определяет экономичность работы ДВС и его ресурс. На трение в ней приходится до 60 % всех механических потерь в двигателе [3] и до 26 % всех потерь в дизеле [4]. В этой паре трения существует полный набор режимов смазки (граничный, смешанный, гидродинамический), причем их относительные доли изменяются в зависимости от такта рабочего цикла.

Поршневые кольца являются важнейшими конструктивными элементами в двигателях внутреннего сгорания, обеспечивающими не только уплотнение рабочего объема, но и передачу тепла от поршня к втулкам цилиндров, а также регулирование толщины смазочного масла на их стенках [5]. Знание величины механических потерь, обусловленных трением поршневых колец в конкретном двигателе, а также относительной доли потерь, приходящихся на разные режимы смазки, является очень важным фактором при реализации новых технологических решений повышения их антифрикционных характеристик и контроле их эффективности. Очевидно, что несмотря на развитие расчетных методов и компьютерного моделирования [6–9], многие явления, происходящие в смазочном слое при трении поршневых колец, остаются малоизученными [10], а значит, расчетные методы не всегда могут дать достоверную оценку потерь на трение, и самым надежным методом определения является эксперимент. Однако эксперименты по прямому определению трения поршневых колец требуют применения нестандартных инженерных решений [11]. Поэтому для снижения стоимости и трудоемкости испытаний необходимо отдавать предпочтение экспериментам по косвенному определению трения поршневых колец, например, основанным на сопоставлении

потерь мощности, определенных двумя методами: методом проворачивания коленчатого вала дизеля с помощью постороннего источника энергии (без подачи топлива) и методом сравнения индикаторной и эффективной мощностей. Но такой подход можно было бы применить, если принять, что главной причиной снижения мощности механических потерь при переходе от моторного режима к режиму проворачивания коленчатого вала без подачи топлива является снижение давления прижима поршневых колец к стенке втулки цилиндра. Однако вопросы о том, на какие составляющие механических потерь оказывает влияние снижение давления в рабочем объеме цилиндра при переходе от моторного режима испытаний к режиму проворачивания и является ли снижение давления прижима поршневых колец к стенке втулки цилиндра основной причиной уменьшения механических потерь при переходе от испытаний в моторном режиме к режиму испытаний проворачиванием коленчатого вала, остаются нерешенными [11].

Целями представленной работы является оценка возможности определения механических потерь, обусловленных трением поршневых колец по втулкам цилиндров в дизельном двигателе, сопоставление потерь мощности, определенных методом проворачивания коленчатого вала дизеля с помощью постороннего источника энергии (без подачи топлива) и методом сравнения индикаторной и эффективной мощностей.

Методика проведения экспериментов (Experimental methodology)

Эксперименты проводили на испытательном стенде [12], созданном на базе четырехтактного двухцилиндрового дизеля воздушного охлаждения Д120 (2Ч10,5/12) номинальной мощностью 22 кВт, на котором можно оценить механические потери двумя методами: методом сопоставления индикаторной и эффективной мощностей¹ [11] и методом проворачивания коленчатого вала дизеля с помощью постороннего источника энергии [11] (без подачи топлива). При реализации первого метода индикаторную мощность определяли, регистрируя давление в цилиндрах работающего дизеля с помощью датчиков давления (рис. 1), сигналы которых обрабатывались измерительно-вычислительным комплексом. При этом в автоматическом режиме строились и обрабатывались индикаторные диаграммы. Расход топлива при работе на различных маслах измерялся весовым способом. Расчет механического КПД и определение механических потерь проводили по известной стандартной методике [11]. Для реализации второго метода использовалась балансирная подвеска, для проворачивания коленчатого вала применяли электродвигатель переменного тока, установленный на этой подвеске (рис. 2).

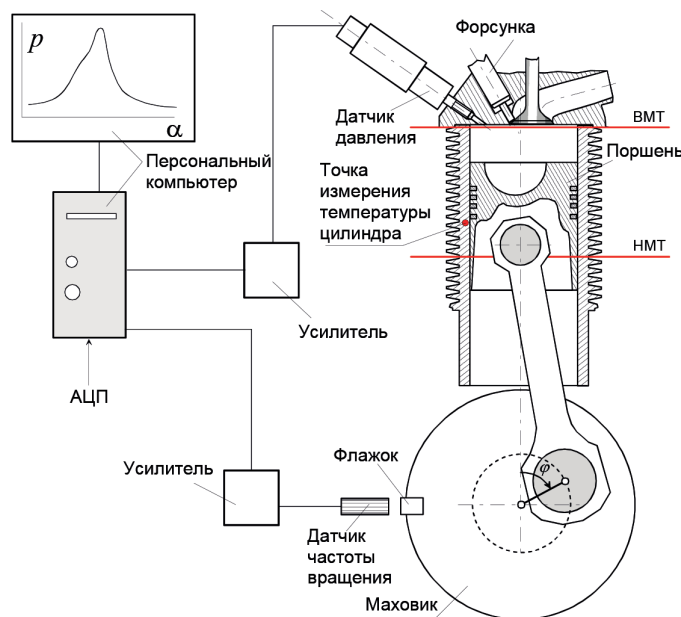


Рис. 1. Схема вычислительного комплекса для регистрации индикаторных диаграмм

¹ Режим испытаний по этому методу условно назовем в работе *моторным режимом*.

Испытания на проворачивание проводили следующим образом. Заводили дизель и после выхода температур масла и цилиндров на заданный уровень перекрывали подачу топлива и сразу включали электродвигатель на проворачивание коленчатого вала. При проворачивании регистрировался момент сопротивления на валу электродвигателя, под действием которого балансирующая подвеска начинала отклоняться относительно оси подвеса.

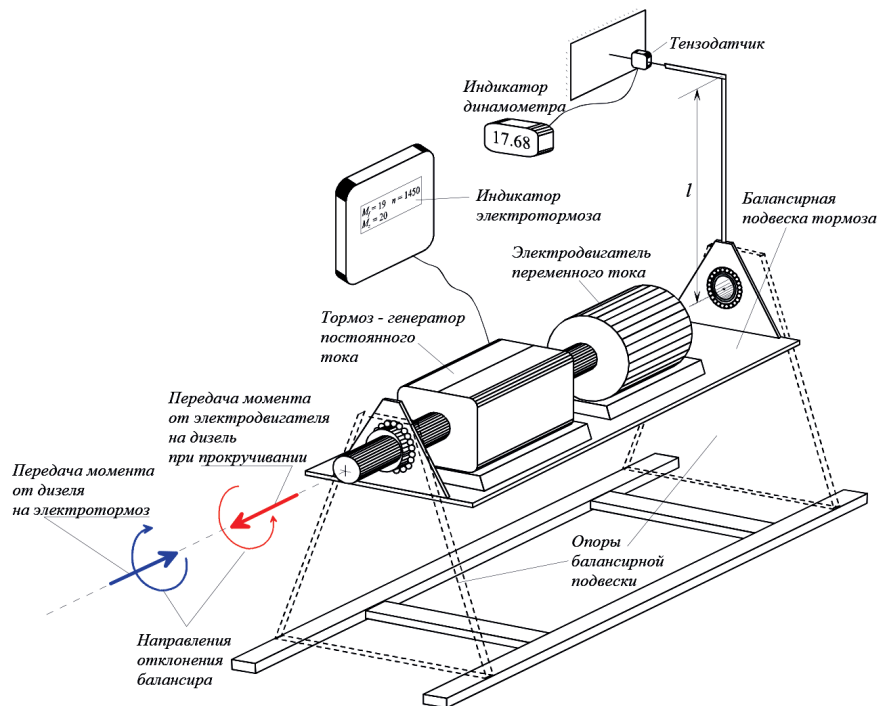


Рис. 2. Схема балансирующей подвески, используемой для определения механических потерь методом проворачивания коленчатого вала дизеля с помощью электродвигателя

Частота вращения коленчатого вала при испытаниях в режиме работающего дизеля и в режиме проворачивания коленчатого вала с помощью электродвигателя поддерживалась примерно одинаковой: при проворачивании она составляла 1475 об/мин, а на работающем дизеле — около 1490 об/мин.

Испытания проводили на моторных маслах разной вязкости, в качестве которых выбрали два масла селективной очистки: И-20А и МС-20, и две смеси этих масел: 67 % И-20А + 33 % МС-20 и 33 % И-20А + 67 % МС-20. Вязкость масел определяли с помощью капиллярных вискозиметров ВПЖ-2 и ВПЖ-4 и термостата. Данные приведены в табл. 1.

Таблица 1

Вязкость масел, испытанных на дизельном стенде

Масло	И-20А	33 % МС-20 + 67 % И-20А	67 % МС-20 + 33 % И-20А	МС-20
Кинематическая вязкость при 85 °С, мм ² /с	7,8	13,8	16,1	26

Поскольку указанные в табл. 1 масла не содержали присадок, обычных для моторных масел, и вязкость масла И-20А при высоких температурах значительно уступает вязкости моторных масел, рекомендуемых для применения в дизеле испытательной установки, эксперименты на работающем дизеле проводили на мощности, равной 30 % от номинального значения.

В процессе испытаний температура окружающего воздуха в испытательном боксе поддерживалась равной 30±1 °С, температура масла в картере двигателя — равной 85±1 °С, температура контрольной точки стенки цилиндра (см. рис. 1) составляла 105 °С.

Результаты экспериментов (Experiment results)

В работе [13] показано, что между мощностью механических потерь $N_{\text{мех}}$ и вязкостью ν моторного масла существует линейная зависимость, что подтверждено последующими экспериментами на дизельном стенде. Как видно из рис. 3, а, графики представляют собой прямые, имеющие следующий аналитический вид:

$$N_{\text{мех}}^{\text{мот}} = N_0^{\text{мот}} + 78,0\nu; \quad (1)$$

$$N_{\text{мех}}^{\text{пр}} = N_0^{\text{пр}} + 63,5\nu. \quad (2)$$

Зависимость (1) относится, соответственно, к условиям испытаний в моторном режиме (на рис. 3, а линия 1), зависимость (2) — к условиям проворачивания (на рис. 3, а линия 2).

Постоянные $N_0^{\text{мот}}$ и $N_0^{\text{пр}}$ в выражениях (1) и (2) определены в статье [13] как потери мощности, приходящиеся на граничный режим смазки. Однако, строго говоря, это не так. По всей видимости, по физическому смыслу значения $N_0^{\text{мот}}$ и $N_0^{\text{пр}}$ соответствуют потерям мощности при трении без смазочного масла и считать их равными потерям, приходящимся на граничный режим смазки, можно лишь приближенно. Известно, что вязкость масла влияет по-разному на трение при разных режимах смазки [14]. При испытании масел одного гомологического ряда увеличение вязкости означает увеличение длины молекулярной цепочки масла. Поэтому в режиме граничной смазки увеличение вязкости будет способствовать снижению механических потерь (рис. 3, б) за счет увеличения толщины адсорбированного слоя, а в режиме гидродинамической смазки увеличение вязкости будет увеличивать механические потерь из-за увеличения внутреннего трения. Так как испытанные масла не содержат присадок, величина снижения мощности механических потерь при граничном режиме смазки $\Delta N_{\text{гр}}$ очень мала и, по сути, значение N_0 примерно равно мощности механических потерь при граничном режиме смазки.

Значения $N_0^{\text{мот}}$ и $N_0^{\text{пр}}$ найдем экстраполяцией зависимостей (1) и (2) до пересечения с осью ординат (рис. 3), т. е. до значения $\nu = 0$:

$$N_0^{\text{мот}} = 5508 \text{ Вт};$$

$$N_0^{\text{пр}} = 4637 \text{ Вт}.$$

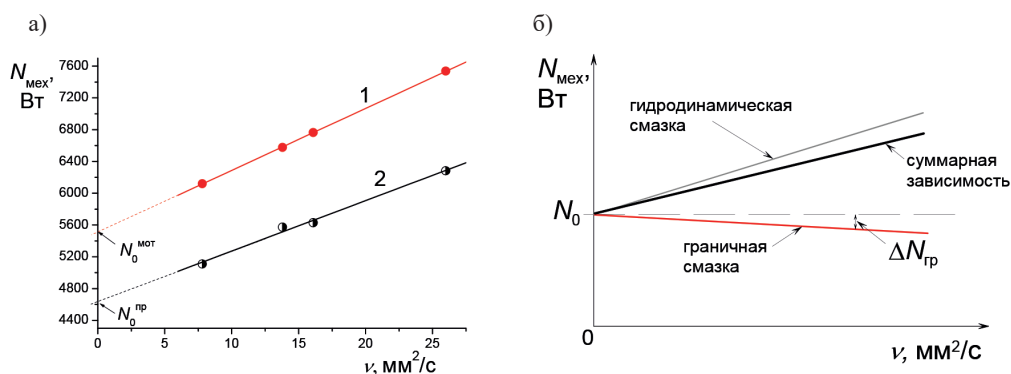


Рис. 3. Зависимости мощности механических потерь, полученных при испытании дизеля в моторном режиме 1 и в режиме проворачивания коленчатого вала дизеля с помощью электродвигателя 2, от вязкости используемого моторного масла при температуре в картере 85 °С (а) и схема влияния вязкости на мощность механических потерь в граничном и гидродинамическом режиме смазки (б)

Тогда приближенно потери мощности на трение в дизеле, обусловленные работой узлов в режиме жидкостной (гидродинамической) смазки (см. рис. 3, а), можно представить следующим образом:

$$(N_{\text{гд}})_{\text{мот}} \approx 78,0\nu;$$

$$(N_{\text{гд}})_{\text{пр}} \approx 63,5\nu,$$

где $(N_{\text{гд}})_{\text{мот}}$ и $(N_{\text{гд}})_{\text{пр}}$ — потери мощности на гидродинамическое трение при испытании дизеля в моторном режиме и в режиме проворачивания коленчатого вала от электродвигателя соответственно.

Как видно, механические потери в работающем дизеле превышают механические потери при проворачивании коленчатого вала дизеля от постороннего источника энергии примерно на 16 %. Зависимость разности механических потерь от вязкости (рис. 4) можно представить в виде следующей суммы:

$$\Delta N_{\text{мех}} = N_{\text{мех}}^{\text{мот}} - N_{\text{мех}}^{\text{пр}} = (\Delta N_{\text{мех}})_{\text{гр}} + (\Delta N_{\text{мех}})_{\text{гд}} = 871 + 14,5 \nu,$$

где $(\Delta N_{\text{мех}})_{\text{гр}}$ — разница в механических потерях, равная 871 Вт, приходящихся на граничную смазку при испытании дизеля в моторном режиме и режиме проворачивания; $(\Delta N_{\text{мех}})_{\text{гд}}$ — разница в механических потерях, определяемая как 14,5v, приходящихся на гидродинамическую смазку при испытании дизеля в моторном режиме и режиме проворачивания.

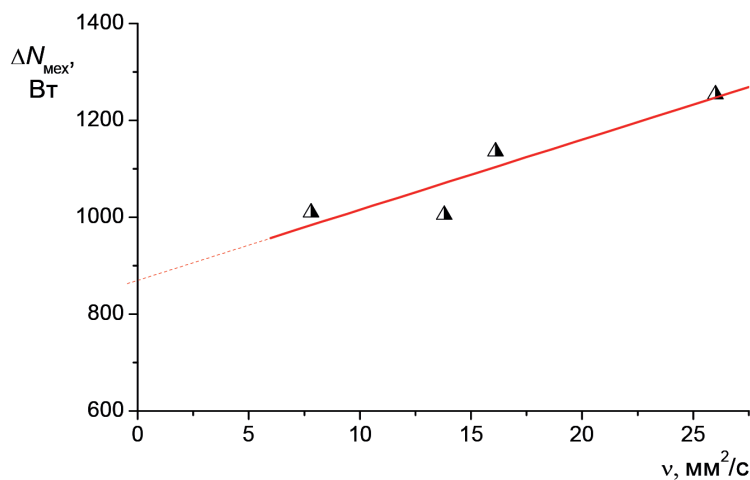


Рис. 4. Зависимость разности механических потерь в работающем дизеле и при проворачивании коленчатого вала от постороннего источника энергии от вязкости моторного масла

График на рис. 4 получен вычитанием ординат точек зависимости 2 из соответствующих ординат зависимости 1 на рис. 3, а.

Анализ результатов эксперимента (Analysis of experiment results)

Допустим, что основной силой, прижимающей поршневые кольца к стенке цилиндра, является сила давления газов в рабочем объеме цилиндров (рис. 5). При испытании проворачиванием коленчатого вала от электродвигателя топливо в камеру сгорания не подается, и соответственно горение топлива отсутствует, а значит, давление газов p_r в рабочем объеме цилиндра повышается только за счет сжатия воздуха, поэтому оно существенно ниже максимального давления сгорания. Соответственно в режиме проворачивания давление прижима поршневых колец к стенке цилиндров существенно ниже, и поэтому меньше механические потери.

Представим мощность механических потерь $N_{\text{мех}}$ в виде следующей суммы:

$$N_{\text{мех}} = N_{\text{но}} + N_{\text{нп}} + N_{\text{кв}} + N_{\text{гр}} + N_{\text{пор}} + N_{\text{пк}} + N_{\text{мс.к}}, \quad (3)$$

где $N_{\text{но}}$ — механические потери на привод навесного оборудования; $N_{\text{нп}}$ — насосные потери; $N_{\text{кв}}$ — потери мощности на трение в подшипниках коленчатого вала; $N_{\text{гр}}$ — потери мощности на трение в механизме газораспределения; $N_{\text{пор}}$ — потери мощности на трение поршня о стенку цилиндра; $N_{\text{пк}}$ — потери мощности на трение уплотнительных (компрессионных) поршневых колец о стенку цилиндра; $N_{\text{мс.к}}$ — потери мощности на трение маслосъемных поршневых колец о стенку цилиндра.

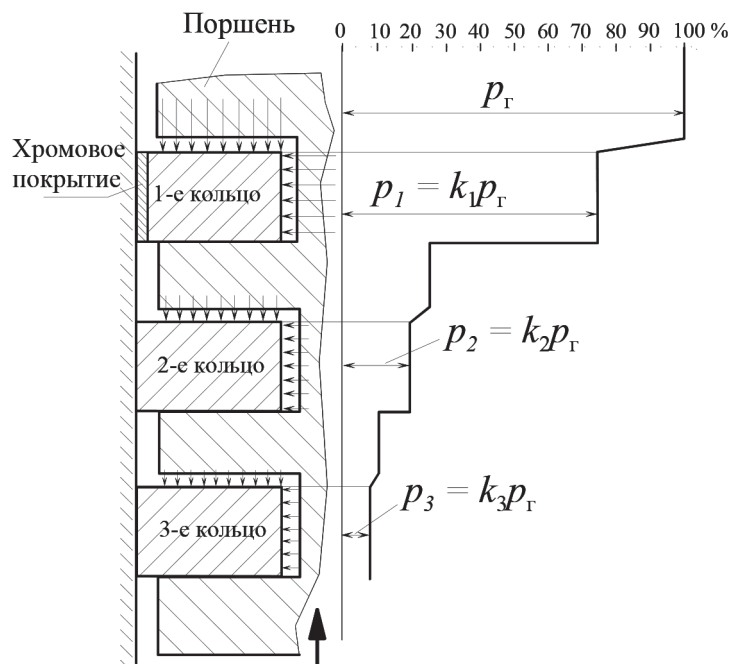


Рис. 5. Схема действия давления прижима поршневых колец к стенке цилиндра дизеля Д120

Если принять, что основной причиной высоких механических потерь, определенных на работающем дизеле, является более высокое усилие прижима поршневых колец к стенке цилиндра, то разница в значениях $N_{\text{мех}}$ между режимом работающего дизеля и режимом проворачивания коленчатого вала от электродвигателя (рис. 4) обусловлена только разницей в трении компрессионных поршневых колец $N_{\text{ПК}}$, т. е. остальные слагаемые в выражении (3) учитывать не будем. Следовательно,

$$\Delta N_{\text{мех}} = N_{\text{ПК}}^{\text{мот}} - N_{\text{ПК}}^{\text{пр}}, \quad (4)$$

где $N_{\text{ПК}}^{\text{мот}}$ — мощность потерь на трение компрессионных поршневых колец по стенкам цилиндров при испытании дизеля в моторном режиме; $N_{\text{ПК}}^{\text{пр}}$ — потери мощности на трение компрессионных поршневых колец по стенкам цилиндров при испытании дизеля в режиме проворачивания коленчатого вала от электродвигателя.

В дизеле 2Ч10,5/12 три компрессионных кольца: верхнее хромированное и два нижних без покрытия. Представим мощности $N_{\text{ПК}}^{\text{мот}}$ и $N_{\text{ПК}}^{\text{пр}}$ в следующем виде:

$$N_{\text{ПК}} = N_{\text{ПК1}} + N_{\text{ПК2}} + N_{\text{ПК3}},$$

где $N_{\text{ПК1}}$, $N_{\text{ПК2}}$ и $N_{\text{ПК3}}$ — потери мощности в первых, вторых и третьих уплотнительных кольцах соответственно.

Поэтому мощность механических потерь, приходящуюся на j -е кольцо, можно выразить следующим образом:

$$N_{\text{ПК}_j} = \frac{A_{\text{тр}_j} k z n}{60} = \frac{T_j 4 S k z n}{60} = \frac{f_j P_j 4 S k z n}{60} = \frac{f_j p_j F 4 S k z n}{60}, \quad (5)$$

где $A_{\text{тр}_j}$ — работа трения j -го кольца за один рабочий цикл; k — число цилиндров; z — коэффициент тактности, равный для четырехтактного дизеля 0,5; n — частота вращения коленчатого вала (с^{-1}); T_j — среднее значение силы трения j -го кольца; S — ход поршня; $4S$ — путь, пройденный кольцом за рабочий цикл (четыре такта); P_j — сила давления j -го кольца на стенку цилиндра; F — площадь поверхности трения поршневого кольца; f_j — коэффициент трения j -го кольца; p_j — давление j -го кольца на стенку цилиндра, осредненное по времени цикла.

С достаточной для практики точностью можно считать, что отличие в трении компрессионных поршневых колец при испытании дизеля в моторном режиме и режиме проворачивания коленчатого вала имеет место только в рабочем такте (рис. 6), в остальных тактах давление прижима компрессионных колец к стенке втулки в моторном режиме и режиме проворачивания одинаково. Очевидно, что поршневые кольца дизеля работают в разных температурных режимах: более всего нагревается верхнее компрессионное кольцо, менее всего — нижнее. При этом сила прижима колец изменяется также в зависимости от угла поворота коленчатого вала.

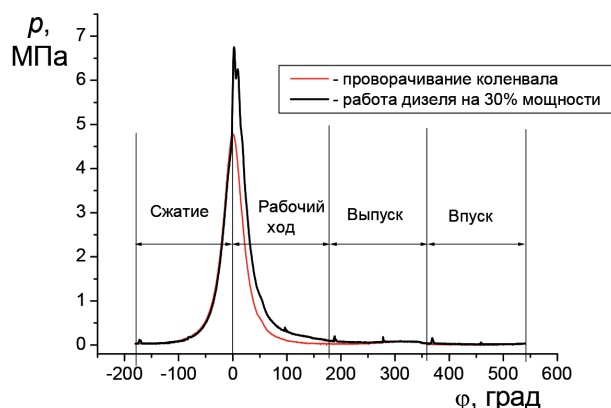


Рис. 6. Пример индикаторных диаграмм, зарегистрированных при испытании дизеля в моторном режиме и режиме проворачивания коленчатого вала от электродвигателя (масло МС-20)

Опыты на машине трения МИ-1 образцов, вырезанных из поршневых колец дизеля Д120, показали, что коэффициенты трения образцов колец с хромовым покрытием и образцов колец без покрытия практически одинаковы и не зависят от нагрузки и температуры моторного масла (рис. 7). Необходимо отметить, что отсутствие заметного влияния температуры масла на трение материалов колец при смазывании их маслами с вязкостью, близкой к вязкости моторного масел, подтверждено также в работе [15] в ходе проведения экспериментов на машине трения возвратно-поступательного движения.

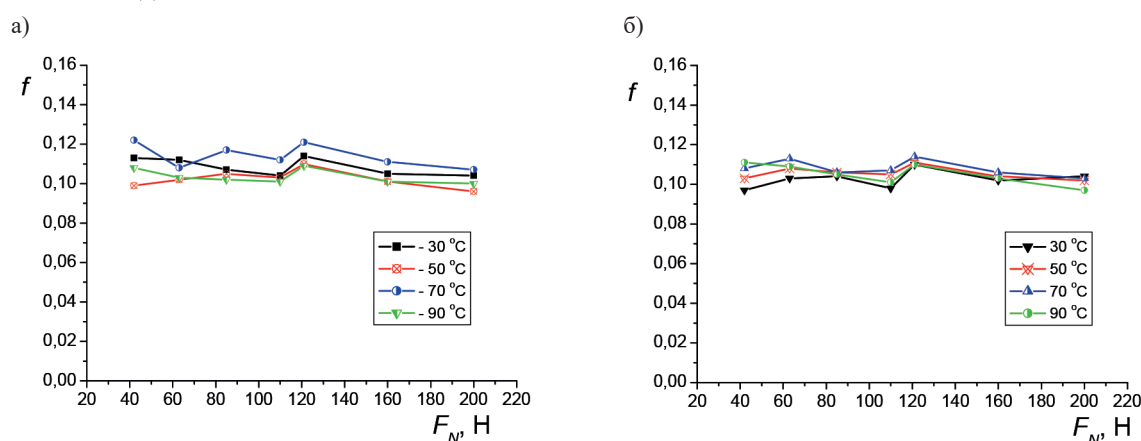


Рис. 7. Зависимость коэффициента трения: а — образцов хромированного кольца; б — образцов кольца без покрытия по ролику из серого перлитного чугуна

Результаты экспериментов на специальном дизельном стенде [16] также позволяют предположить, что коэффициент трения поршневых колец практически не изменяется в разных положениях поршня в течение рабочего такта. С учетом ранее изложенного, подставляя выражение (5) в выражение (4), можно переписать выражение (4) в следующем виде:

$$\Delta N_{\text{мех}} = N_{\text{ПК}}^{\text{мот}} - N_{\text{ПК}}^{\text{пр}} = \frac{fFSkzn}{60} \sum_{j=1}^{i=3} (p_{\text{РХ}}^{\text{мот}} - p_{\text{РХ}}^{\text{пр}})_j, \quad (6)$$

где f — коэффициент трения, принятый равным для всех поршневых колец, и не зависящий от температуры и нагрузки в исследуемом диапазоне; $p_{\text{РХ}}^{\text{мот}}$ и $p_{\text{РХ}}^{\text{пр}}$ — среднее давление прижима j -го поршневого кольца в течение рабочего хода при испытании дизеля в моторном режиме и режиме проворачивания коленчатого вала от электродвигателя² соответственно.

Для того чтобы воспользоваться выражением (6), необходимо знать значения давлений прижима колец к стенке цилиндра. Известно, что давление прижима колец существенно различается для верхних и нижних колец. Как видно из рис. 8 на примере дизеля Д120, износ верхних колец в 2,3 раза превышает износ нижних несмотря на то, что верхние кольца имеют хромированную поверхность трения, что указывает на существенно более высокое давление прижима верхних колец по сравнению со вторыми и третьими кольцами. Оценить соотношение давлений можно воспользовавшись уравнением Арчарда [14], которое можно записать следующим образом:

— для верхних колец:

$$h_1 = K_1 \frac{p_1}{H_1} l_1, \quad (7)$$

где K_1 — коэффициент износа верхних колец; p_1 — давление прижима верхних колец к стенке цилиндра; H_1 — твердость верхних колец; l_1 — путь трения верхних колец;

— для вторых и третьих колец:

$$h_{2,3} = K_{2,3} \frac{p_{2,3}}{H_{2,3}} l_{2,3}, \quad (8)$$

где $K_{2,3}$ — коэффициент износа нижних колец; $p_{2,3}$ — давление прижима верхних колец к стенке цилиндра; $H_{2,3}$ — твердость верхних колец; $l_{2,3}$ — путь трения нижних колец.

Поделив выражение (7) на (8), получим

$$\frac{h_1}{h_{2,3}} = \frac{K_1}{K_{2,3}} \frac{p_1}{p_{2,3}} \frac{H_{2,3}}{H_1} \frac{l_1}{l_{2,3}},$$

или с учетом того, что $l_1 = l_{2,3}$

$$\frac{p_1}{p_{2,3}} = \frac{h_1}{h_{2,3}} \frac{K_{2,3}}{K_1} \frac{H_1}{H_{2,3}}.$$

Из рис. 8 следует, что $h_1 = 2,3h_{2,3}$. По результатам измерения микротвердости хромового покрытия верхних колец и чугуна нижних колец $H_1 = 2,8H_{2,3}$, а также результатам испытаний образцов колец на машине трения коэффициенты износа $K_{2,3} \approx 3,5K_1$ получается, что $p_1 \gg p_{2,3}$. Действительно, исследования [16, 17] показали, что давление прижима верхнего компрессионного кольца кратно превышает давление прижима нижних колец, тем не менее сумма давлений на все компрессионные кольца примерно равна давлению газов в камере сгорания. Например, согласно [18], давление прижима верхнего компрессионного кольца составляет примерно 75 %, второго — 20 %, третьего — 8 % от давления газов в камере сгорания, т. е. $k_1 = 0,75$; $k_2 = 0,20$; $k_3 = 0,08$ (см. рис. 5), т. е. $k_1 + k_2 + k_3 \approx 1$. Поэтому знак суммы в выражении (6) можно убрать, преобразовав его к следующему виду:

$$\Delta N_{\text{мех}} = N_{\text{ПК}}^{\text{мот}} - N_{\text{ПК}}^{\text{пр}} = \frac{fFSkzn}{60} \left[(p_{\text{РХ}}^{\text{мот}})_r - (p_{\text{РХ}}^{\text{пр}})_r \right],$$

где $(p_{\text{РХ}}^{\text{мот}})_r$ и $(p_{\text{РХ}}^{\text{пр}})_r$ — средние давления газов в течение рабочего хода при испытании дизеля в моторном режиме и режиме проворачивания коленчатого вала от электродвигателя.

² В режиме проворачивания за рабочий ход приняли условно 2-й такт (1-й такт — такт сжатия).

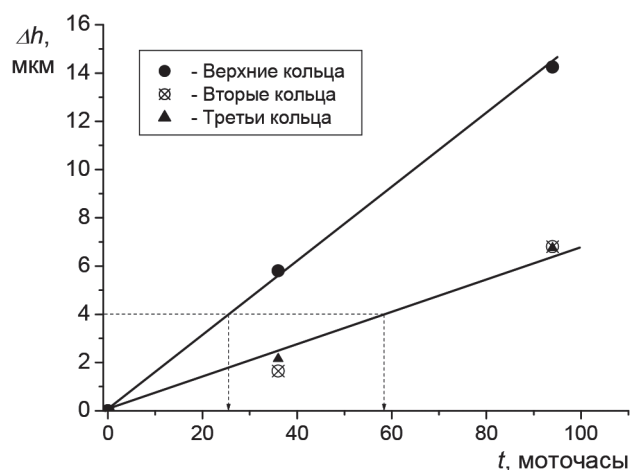


Рис. 8. Износ поршневых колец дизеля Д120, осредненный по двум цилиндрам в зависимости от продолжительности работы дизеля

Следовательно,

$$f = \frac{60 \Delta N_{\text{мех}}}{FSkzn \left[\left(p_{\text{рх}}^{\text{мот}} \right)_i - \left(p_{\text{рх}}^{\text{пр}} \right)_i \right]} \quad (9)$$

Площадь поверхности трения поршневых колец дизеля $F = 989 \text{ мм}^2$, исходя из предположения, что кольца приработаны, и контакт кольца с поверхностью цилиндра полный, а ход поршня $S = 0,12 \text{ м}$. Средние давления определим по формуле

$$p_i = \frac{1}{180} \int_0^{180} p d\varphi.$$

Интегралы в последнем выражении определены численным интегрированием индикаторных диаграмм $p(v)$ в пределах рабочего такта. По результатам численного интегрирования были рассчитаны разности средних индикаторных давлений в знаменателе выражения (9), а затем и коэффициенты трения (табл. 2).

Таблица 2

**Результаты расчета коэффициента трения
компрессионных поршневых колец по формуле (9)**

Масло	$\left(p_{\text{рх}}^{\text{мот}} \right)_i - \left(p_{\text{рх}}^{\text{пр}} \right)_i$, МПа	f
И-20А	0,5270	0,512
33 % МС-20 + 67 % И-20А	0,5277	0,509
67 % МС-20 + 33 % И-20А	0,5343	0,568
МС-20	0,5595	0,598

Как видно из результатов, представленных в табл. 2, методика определения коэффициента трения, основанная на сравнении механических потерь, полученных при испытании дизеля методом проворачивания коленчатого вала дизеля с помощью постороннего источника энергии (без подачи топлива) и при испытании методом сравнения индикаторной и эффективной мощностей, дает значения коэффициента трения колец, завышенные в несколько раз. Так, по многочисленным сведениям, приведенным в научных публикациях по результатам экспериментальной оценки коэффициента трения поршневых колец, его значение колеблется в диапазоне 0,06–0,18 [5, 16, 17]. Применительно к дизелю Д120, согласно выражению (9), коэффициенту трения поршневых колец, равному около 0,12, должно соответствовать значение $\Delta N_{\text{мех}} \approx 200\text{--}250 \text{ Вт}$. Полученные в настоящей работе

высокие значения коэффициента трения указывают на то, что более низкие значения механических потерь, получаемые при испытании дизеля проворачиванием коленчатого вала с помощью электродвигателя, по сравнению с испытаниями в моторном режиме, обусловлены не только меньшим давлением прижатия поршневых колец к стенке цилиндра, но и другими причинами. Причины погрешности определения механических потерь при использовании метода проворачивания коленчатого вала рассмотрены, в частности, в работе [11]. В данном случае наиболее вероятными причинами более низких потерь, чем следовало ожидать, если бы основной причиной было снижение трения поршневых колец, являются следующие.

Первой причиной более низких потерь является изменение мощности потерь на трение в подшипниках коленчатого вала (составляющая $N_{\text{кв}}$ в выражении (3)). Более высокая сила давления при сгорании топлива приводит к уменьшению минимальной толщины смазочного слоя подшипников коленчатого вала, работающих преимущественно в режиме гидродинамической смазки. Уменьшение минимальной толщины приводит к увеличению градиента скорости по толщине смазочного слоя и, как следствие, к увеличению потерь на внутреннее трение (в смазочном слое). Оценочные расчеты мощности трения в подшипниках коленчатого вала дизеля Д120 (три коренных и два шатунных) при условии их работы в режиме гидродинамической смазки показывают, что при переходе от проворачивания к моторному режиму увеличение потерь в пяти подшипниках коленчатого вала дизеля Д120 может достигать 250 Вт. Однако моделирование смазочного слоя в подшипниках коленчатых валов тепловозных дизелей [19, 20] показало, что возможны разрывы смазочного слоя и нарушение гидродинамического режима смазки на сравнительно протяженном отрезке, соответствующем углу коленчатого вала, равному около 100° . Очевидно, что в случае возникновения участков граничной смазки трение существенно возрастает. Если такие участки при испытании проворачиванием коленчатого вала дизеля от постороннего источника энергии отсутствуют, то, соответственно, и разница в потерях мощности на трение в подшипниках коленчатого вала при переходе от проворачивания к моторному режиму может превысить значение 250 Вт.

Второй причиной более низких потерь при переходе от моторного режима испытаний к испытанию методом проворачивания коленчатого вала является уменьшение трения поршня. Согласно работам [20], увеличение давления газов в цилиндрах ведет к увеличению боковой силы, прижимающей поршень к стенке цилиндра, а исследования на дизеле 2Ч10,5/12 показали, что трение поршня в режимах гидродинамической, смешанной и граничной смазки происходит в течение 49, 44 и 7 % от времени рабочего цикла соответственно³. При увеличении боковой силы уменьшается толщина слоя смазочного масла, а значит, увеличивается градиент скорости по толщине слоя и, как следствие, наблюдается рост потерь на трение.

Таким образом, явление снижения механических потерь в дизеле при переходе от испытаний в моторном режиме к испытаниям методом проворачивания нельзя объяснить только снижением трения компрессионных поршневых колец. Снижение давления в рабочем объеме цилиндров приводит к снижению трения и в других трибосопряжениях дизеля, причем вклад последних в снижение механических потерь при переходе к испытаниям в режиме проворачивания может превосходить по величине вклад, обусловленный трением поршневых колец.

Выводы (Conclusions)

На основе выполненного исследования можно сделать следующие выводы:

1. Снижение трения компрессионных поршневых колец вследствие уменьшения давления прижима к стенке цилиндра не является единственной причиной падения мощности механических потерь при переходе от моторного режима испытаний дизеля к испытанию методом проворачивания коленчатого вала от постороннего источника энергии. Поэтому на основе анализа разности механических потерь, полученных методом сопоставления индикаторной и эффективной мощности и методом проворачивания коленчатого вала дизеля с помощью постороннего ис-

³ Путинцев, С. В. Механические потери в поршневых двигателях: специальные главы конструирования, расчета и испытаний: электронное учебное пособие. М.: МВТУ им. Н. Э. Баумана, 2011. 288 с.

точника энергии (без подачи топлива), не представляется возможным определить коэффициенты трения поршневых колец.

2. Наряду со снижением трения поршневых колец на падение мощности механических потерь при переходе от моторного режима испытаний дизеля к испытанию методом проворачивания коленчатого вала существенное влияние оказывает, по всей видимости, снижение трения в коренных и шатунных подшипниках коленчатого вала, а также снижение трения поршней о стенку цилиндров.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Ерофеев В. Л.* Управление энергоэффективностью объектов морской техники и судовых двигателей внутреннего сгорания / В. Л. Ерофеев, В. А. Жуков, О. В. Мельник [и др.]. — Санкт-Петербург: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования Государственный университет морского и речного флота им. адмирала С. О. Макарова, 2018. — 184 с. — EDN ZIZXNR.

2. *Ханнанов М. Д.* Экспериментальное исследование механических потерь современного дизеля / М. Д. Ханнанов, И. Ф. Гумеров, Л. И. Фардеев, А. С. Куликов, Э. Р. Алимгулов // Тракторы и сельхозмашины. — 2022. — Т. 89. — № 3. — С. 187–195. DOI: 10.17816/0321-4443-106271. — EDN VMAZNB.

3. *Wakuri Y.* Piston ring friction in internal combustion engines / Y. Wakuri, T. Hamatake, M. Soejima, T. Kitahara // Tribology International. — 1992. — Vol. 25. — Is. 5. — Pp. 299–308. DOI: 10.1016/0301-679X(92)90027-K.

4. *Gangopadhyay A.* A Review of Automotive Engine Friction Reduction Opportunities Through Technologies Related to Tribology / A. Gangopadhyay // Transactions of the Indian Institute of Metals. — 2017. — Vol. 70. — Is. 2. — Pp. 527–535.

5. *Kumar R.* Experimental and Simulation Study of Piston Ring Pack Influence on Heat Transfer and Friction / R. Kumar, S. Sambhav, P. R. Yadav, Md S. Ansari, A. Ansari, M. Ansari & S. Kumar // International Journal of Advanced Research in Science, Communication and Technology. — 2025. — Vol. 5. — Is. 11. — Pp. 106–110. DOI: 10.48175/IJARSC-27212.

6. *Delprete C.* Piston ring–liner lubrication and tribological performance evaluation: A review / C. Delprete, A. Razavykia // Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J: Journal of Engineering Tribology. — 2018. — Vol. 232. — Is. 2. — Pp. 193–209. DOI: 10.1177/1350650117706269.

7. *Руднев Б. И.* Расчетно-экспериментальное определение коэффициента трения компрессионных поршневых колец в судовом дизеле / Б. И. Руднев, О. В. Повалихина // Актуальные проблемы освоения биологических ресурсов Мирового океана: Материалы VIII Международной научно-технической конференции, Владивосток, 23–24 мая 2024 года. — Владивосток: Дальневосточный государственный технический рыбохозяйственный университет, 2024. — С. 312–316. DOI: 10.48612/dalrybvtuz/mntk-wo-2024-32. — EDN HUNYGH.

8. *Nikolopoulou V-I.* A Comparative Analysis of Friction and Energy Losses in Hydrogen and CNG Fueled Engines: Implications on the Top Compression Ring Design Using Steel, Cast Iron, and Silicon Nitride Materials / V-I. Nikolopoulou, A. Zavos, P. Nikolakopoulos // Materials. — 2024. — Vol. 17. — Is. 15. DOI: 10.3390/ma17153806.

9. *Liu N.* Simulation on the effect of cylinder liner and piston ring surface roughness on friction performance / N. Liu, C. Wang, Q. Xia, Y. Gao, P. Liu // Mechanics & Industry. — 2022. — Vol. 23. — Pp. 8. DOI: 10.1051/meca/2022007.

10. *Dellis P.* Comparative Research in the Field of the Parametric Effect of Lubricant Cavitation Initiation and Development on Friction and Wear in Piston Ring and Cylinder Liner Assemblies / P. Dellis // Lubricants. — 2024. — Vol. 12. — Is. 12. DOI: 10.3390/lubricants12120460.

11. *Стефановский Б. С.* Испытания двигателей внутреннего сгорания / Б. С. Стефановский, Е. А. Скобцев, Е. К. Корси и др. — М: Машиностроение, 1972. — 368 с.

12. *Цветков Ю. Н.* Дизельный стенд для испытаний смазочных материалов / Ю. Н. Цветков, А. А. Татулян, В. Н. Кузьмин, Д. А. Крылов // Журнал университета водных коммуникаций. — 2011. — № 3. — С. 57–66. — EDN OIVVDH.

13. *Цветков Ю. Н.* Соотношение потерь на трение, приходящихся на граничный и гидродинамический режимы смазки, в двигателях внутреннего сгорания / Ю. Н. Цветков, Д. А. Крылов, А. А. Татулян // Двигателестроение. — 2010. — № 1(239). — С. 13–19. — EDN MRMKHB.

14. Мышкин Н. К. Трибология. Принципы и приложения / Н. К. Мышкин, М. И. Петроковец. — Гомель: ИММС НАНБ, 2002. — 310 с.
15. Du C. Effects of Temperature on the Tribological Properties of Cylinder-Liner Piston Ring Lubricated with Different Oils / C. Du, C. Sheng, X. Liang, X. Rao, Z. Guo // *Lubricants*. — 2023. — Vol. 11. — Is. 3. DOI: 10.3390/lubricants11030115.
16. Мур Д. Основы и применения трибоники / Д. Мур — Л: Мир, 1978. — 487 с.
17. Энгелиш К. Поршневые кольца / К. Энгелиш. — М: Машгиз, 1962. — Том 1. — 583 с.
18. Луканин В. Н. Двигатели внутреннего сгорания. В 3-х кн. Кн. 1. Теория рабочих процессов / В. Н. Луканин, К. А. Морозов, А. С. Хачиян, И. В. Алексеев, Л. Н. Голубков, Б. Я. Черняк [и др.]. — М: Высшая школа, 2007. — 479 с.
19. Захаров С. М. Подшипники коленчатых валов тепловозных дизелей / С. М. Захаров, А. П. Никитин, Ю. А. Загорянский. — М: Транспорт, 1981. — 179 с.
20. Суркин В. И. Смазка пар трения дизелей / В. И. Суркин, Б. В. Курчатов. — Челябинск: Челябинский государственный агроинженерный университет, 1999. — 224 с.

REFERENCES

1. Erofeev, V. L., V. A. Zhukov, O. V. Mel'nik. et al. *Upravlenie energoeffektivnost'yu ob'ektov morskoy tekhniki i sudovykh dvigateley vnutrennego sgoraniya*. Sankt-Peterburg: Federal'noe gosudarstvennoe byudzhethoe obrazovatel'noe uchrezhdenie vysshego obrazovaniya Gosudarstvennyy universitet morskogo i rechnogo flota im. admirala S. O. Makarova, 2018: 184.
2. Khannanov, M. D., I. F. Gumerov, L. I. Fardeev, A. S. Kulikov and E. R. Alimgulov "The experimental study of mechanical losses in the modern diesel engine". *Tractors and Agricultural Machinery*. 89.3 (2022):187–195. DOI: <https://doi.org/10.17816/0321-4443-106271>.
3. Wakuri, Y., T. Hamatake, M. Soejima and T. Kitahara. "Piston ring friction in internal combustion engines." *Tribology International* 25.5 (1992): 299–308. DOI: 10.1016/0301-679X(92)90027-K.
4. Gangopadhyay, A. "A Review of Automotive Engine Friction Reduction Opportunities Through Technologies Related to Tribology." *Transactions of the Indian Institute of Metals* 70.2 (2017): 527–535.
5. Kumar, R., S. Sambhav, P. R. Yadav, Md S. Ansari, A. Ansari, M. Ansari and S. Kumar "Experimental and Simulation Study of Piston Ring Pack Influence on Heat Transfer and Friction". *International Journal of Advanced Research in Science, Communication and Technology* 5.11 (2025): 106–110. DOI: 10.48175/IJARSCT-27212.
6. Delprete, C. and A. Razavykia. "Piston ring–liner lubrication and tribological performance evaluation: A review." *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J: Journal of Engineering Tribology* 232.2 (2018): 193–209. DOI: 10.1177/1350650117706269.
7. Rudnev, B. I. and O. V. Povalikhina. "Calculation-experimental definition of coefficient friction of piston rings in marine." *Aktual'nye problemy osvoeniya biologicheskikh resursov Mirovogo okeana: Materialy VIII Mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii, Vladivostok, 23–24 maya 2024 goda*. Vladivostok: Dal'nevostochnyy gosudarstvennyy tekhnicheskyy rybokhozyaystvennyy universitet, 2024: 312–316. DOI: 10.48612/dalrybvtuz/mntk-wo-2024-32.
8. Nikolopoulou, V–I., A. Zavos and P. Nikolakopoulos. "A Comparative Analysis of Friction and Energy Losses in Hydrogen and CNG Fueled Engines: Implications on the Top Compression Ring Design Using Steel, Cast Iron, and Silicon Nitride Materials." *Materials* 17.15 (2024). DOI: 10.3390/ma17153806.
9. Liu, N., P. Liu et al. "Simulation on the effect of cylinder liner and piston ring surface roughness on friction performance." *Mechanics & Industry* 23 (2022): 8. DOI: 10.1051/meca/2022007.
10. Dellis, P. "Comparative Research in the Field of the Parametric Effect of Lubricant Cavitation Initiation and Development on Friction and Wear in Piston Ring and Cylinder Liner Assemblies." *Lubricants* 12.12 (2024). DOI: 10.3390/lubricants12120460.
11. Stefanovskiy, B. S., E. A. Skobtsev and E. K. Korsi i dr. *Ispytaniya dvigateley vnutrennego sgoraniya*. M: Mashinostroenie, 1972: 368.
12. Tsvetkov, Yu. N., A. A. Tatulyan, V. N. Kuz'min and D. A. Krylov. "Diesel testbed to test lubricants." *Zhurnal universiteta vodnykh kommunikatsiy* 3 (2011): 57–66.
13. Tsvetkov, Yu. N., D. A. Krylov and A. A. Tatulyan. "Sootnoshenie poter' na trenie, prikhodyaschikh na granichnyy i gidrodinamicheskiy rezhimy smazki, v dvigatelyakh vnutrennego sgoraniya." *Engines Construction* 1(239) (2010): 13–19.

14. Myshkin, N. K. and M. I. Petrokovets. *Tribologiya. Printsipy i prilozheniya*. Gomel': IMMS NANB, 2002: 310.
15. Du, C., C. Sheng, X. Liang, X. Rao and Z. Guo "Effects of Temperature on the Tribological Properties of Cylinder-Liner Piston Ring Lubricated with Different Oils" *Lubricants* 11(3) (2023): 1–17. DOI: 10.3390/lubricants11030115.
16. Mur, D. *Osnovy i primeneniya triboniki* Osnovy i primeneniya triboniki. L: Mir, 1978: 487..
17. Englisch, C. *Kolbenringe*. Band 1: Theorie, Herstellung und Bemessung. Wien: Springer-Verlag, 1958.
18. Lukanin, V. N., B. Ya. Chernyak i dr. et al. *Dvigateli vnutrennego sgoraniya. V 3-kh kn. Kn. 1. Teoriya rabochikh protsessov*. M: Vysshaya shkola, 2007: 479.
19. Zakharov, S. M., A. P. Ni-kitin and Yu. A. Zagoryanskiy. *Podshipniki kolenchatykh valov teplovozykh dizeley*. M: Transport, 1981: 179.
20. Surkin, V. I. and B. V. Kurchatov. *Smazka par treniya dizeley*. Chelyabinsk: Chelyabinskiy gosudarstvennyy agroinzhenernyy universitet, 1999: 224.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Цветков Юрий Николаевич —
доктор технических наук, профессор,
Государственный университет морского
и речного флота имени адмирала С. О. Макарова,
198035 Санкт-Петербург,
ул. Двинская, 5/7
e-mail: yuritsvet@mail.ru

Прокошев Дмитрий Олегович —
инженер-конструктор,
ООО «НПК “Энергодвижение”»,
196158, Россия, Санкт-Петербург,
Московское шоссе, 23, корп. 2
e-mail: prokosheff.d@yandex.ru

Мильрат Артур Вячеславович —
старший преподаватель,
Государственный университет морского
и речного флота имени адмирала С. О. Макарова,
198035 Санкт-Петербург, ул. Двинская, 5/7
e-mail: milratav@gumrf.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Tsvetkov Yuriy Nikolayevich —
Grand PhD in Technical Science, Professor,
Admiral Makarov State University of Maritime
and Inland Shipping,
d.5/7, ul. Dvinskaya, Saint-Petersburg,
Russian Federation, 198035.
e-mail: yuritsvet@mail.ru

Prokoshev Dmitriy Olegovich — design engineer,
Limited Liability Company «Scientific-Production
Company «Energy Movement»»,
Moscow highway, d. 23, korp. 2, Saint-Petersburg,
Russia, 196158
e-mail: prokosheff.d@yandex.ru

Mil'rat Artur Vyacheslavovich — senior lecturer,
Admiral Makarov State University of Maritime
and Inland Shipping,
d.5/7, ul. Dvinskaya, Saint-Petersburg,
Russian Federation, 198035.
e-mail: milratav@gumrf.ru

Статья поступила в редакцию: 16 декабря 2025 г.

Received: Dec. 16, 2025

RESEARCH APPROACHES TO IMPROVING THE TECHNOLOGICAL EFFICIENCY OF CONSTRUCTION OF VESSELS OF THE FLOATING POWER UNIT TYPE

E. S. Moseiko¹, E. O. Olkhovik²

¹ “Iceberg” Central Design Bureau, St. Petersburg, Russian Federation

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

The This study analyzes organizational and technological approaches to improving the manufacturability, or technological efficiency, of constructing floating power units (FPUs), which represent a promising solution for energy supply to Arctic territories and the infrastructure of the Northern Sea Route. The relevance of the work is determined by state plans for Arctic development and the necessity of mastering serial production of FPUs, which requires reducing labor intensity, construction time, and costs while ensuring high quality of hull structures and the safety of nuclear power installations. The purpose of the research is to systematize organizational and technical measures aimed at improving efficiency at all stages of the FPU life cycle. The study examines the experience of constructing the “Akademik Lomonosov” and distributed shipyard projects, identifying ten key technological positions in production, including lofting, hull processing, outfitting, and testing. The authors propose developing general technical requirements (GTR) for the fabrication of hull structures, protective shells, and pipelines, as well as introducing albums of standard hull structures and welded joints to standardize production. Particular attention is given to design and technological solutions, such as optimizing the placement of cutouts in sections, minimizing assembly welded joints, and applying probabilistic methods, including PERT/COST, for estimating durations. The study further considers improvements in non-destructive testing of welded joints, the transition to national standards, the potential use of polymer pipelines for auxiliary systems, and optimization of the testing program for protective shells and reactor compartment barriers. A comprehensive system of organizational and technical measures has been developed, covering technological support for construction, quality management, and documentation unification. The obtained results can serve as a methodological basis for the development of manufacturability management programs in serial production of FPUs and may be adapted for other Arctic vessel projects, providing both practical guidance and a framework for improving construction efficiency while maintaining safety and reliability.

Keywords: shipbuilding, ship repair, floating power units, Northern Sea Route, organizational and technological measures, hull structures, welded joints, protective shells, pipelines, construction efficiency.

For citation:

Moseiko, Evgeniy S. and E. O. Olkhovik. “Research approaches to improving the technological efficiency of construction of vessels of the floating power unit type.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 18.1 (2026): 98–111. DOI: 10.21821/2309-5180-2026-18-1-98-111.

УДК 629.12.002

ИССЛЕДОВАНИЕ ПОДХОДОВ ПОВЫШЕНИЯ ТЕХНОЛОГИЧНОСТИ СТРОИТЕЛЬСТВА СУДОВ ТИПА ПЛАВУЧИЕ ЭНЕРГОБЛОКИ

Е. С. Мосейко¹, Е. О. Ольховик²

¹ АО ЦКБ «Айсберг»

² ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова»

В исследовании выполнен анализ организационно-технологических подходов к повышению технологичности строительства плавучих энергоблоков, являющихся перспективным решением для энергоснабжения арктических территорий и инфраструктуры Северного морского пути. Актуальность

работы обусловлена государственными планами по развитию Арктической зоны и необходимостью освоения серийного производства плавучих энергоблоков, требующего снижения трудоемкости, сроков и стоимости строительства при сохранении высокого качества корпусных конструкций и безопасности атомных энергетических установок. Цель исследования заключается в систематизации организационно-технических мероприятий, направленных на повышение эффективности производства плавучих энергоблоков на всех этапах жизненного цикла. Рассмотрен опыт строительства плавучей атомной теплоэлектростанции «Академик Ломоносов» и проектов распределенной верфи, выделены десять ключевых технологических позиций производства — от плазовых работ и корпусообработки до достроечных работ и испытаний. Предложена разработка общих технических требований к изготовлению конструкций корпуса, защитных оболочек и трубопроводов, внедрение альбомов типовых корпусных конструкций и сварных соединений для унификации производства. Особое внимание уделено конструктивно-технологическим решениям: оптимизации расположения вырезов в секциях, минимизации монтажных сварных соединений, применению вероятностных методов оценки сроков (PERT/COST). Исследование содержит предложения по совершенствованию неразрушающего контроля сварных соединений с учетом перехода на национальные стандарты, возможности применения полимерных трубопроводов для вспомогательных систем, а также оптимизации программы испытаний защитных оболочек и ограждений реакторного отсека. Разработана система организационно-технических мероприятий, включающая технологическое обеспечение строительства, управление качеством и унификацию документации. Полученные результаты могут служить методологической основой для разработки программ управления технологичностью при серийном производстве плавучих энергоблоков и быть адаптированы для других проектов судов арктического назначения.

Ключевые слова: плавучие энергетические блоки, Северный морской путь, строительство судов, организационно-технологические мероприятия, усиление корпуса судна, водонепроницаемые и противопожарные переборки, сварные соединения, герметичность, защитная оболочка, трубопроводы.

Для цитирования:

Мосейко Е. С. Исследование подходов повышения технологичности строительства судов типа плавучие энергоблоки / Е. С. Мосейко, Е. О. Ольховик // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2026. — Т. 18. — № 1. — С. 98–111. DOI: 10.21821/2309-5180-2026-18-1-98-111. — EDN WEBLFH.

Введение (Introduction)

Государственные планы по развитию Северного морского пути¹ (СМП) и его инфраструктуры² предполагают развитие энергетических мощностей, обеспечивающих функционирование инфраструктуры СМП пути и прибрежных территорий. Плавучие энергоблоки (ПЭБ) предназначены для работы в качестве источника электроэнергии в составе инфраструктуры для обеспечения выдачи в береговую сеть электроэнергии и потребителям собственных нужд. Представляет собой новый класс энергоисточников на базе атомного судостроения. Ледовые усиления корпуса спроектированы на класс Arc4 с учетом арктических условий и районов эксплуатации ПЭБ. Корпус ПЭБ выполнен в виде понтона с двойным дном и двойными бортами, разделен на отсеки водонепроницаемыми поперечными и противопожарными переборками, имеет продольную систему набора.

В перспективе планируется выпуск серийных ПЭБ с разными типами мощностей выдачи или электроэнергии на берег [1], что потенциально обеспечит Арктическую зону Российской Федерации необходимыми энергоресурсами [2] для развития. При этом в рассмотренном исследовании [3] о развитии судостроения предлагается применение блоков-модулей секций, включающее в их состав судовое оборудование, трубопроводов и арматуры для снижения трудоемкости в корпусостроительном производстве. Рассмотрены варианты строительства судов в межзаводской кооперации. Тем не менее по этой причине потребуются необходимость внедрения крупного кранового оборудования. Кроме того, в проведенном исследовании [4] о состоянии современного

¹ Распоряжение Правительства РФ от 01.08.2022 № 2115-р (ред. от 28.04.2023) «Об утверждении Плана развития Северного морского пути на период до 2035 года».

² Распоряжение Правительства РФ от 21.12.2019 № 3120-р (ред. от 29.04.2021) «Об утверждении Плана развития инфраструктуры Северного морского пути на период до 2035 года».

отечественного судостроения объясняется, что крупносерийного строительства судов практически нет. Осуществляя строительство в основном головных судов, наши верфи, как правило, множат убытки, что не позволяет наращивать мощности. Отмечается, что в настоящее время более стабильно и уверенно работают в основном отечественные верфи, которые строят большие серии речного флота и суда смешанного плавания.

Объективной необходимостью для процесса проектирования и строительства ПЭБ становится поиск путей повышения технологичности корпусных конструкций, возможность повышения их качества, что косвенно может повлиять на снижение затрат [5]. Большинство технологической документации применяется при изготовлении секций корпусных конструкций для корпусосборочного и стапельного производств. В связи с намеченными тенденциями к увеличению количества ПЭБ предлагается систематизировать организационные и технические мероприятия в виде обеспечения технологичности строительства судна. Таким образом, основные направления организационно — технологической подготовки производства состоят в следующем:

- графике постройки и разработка оперативно-календарных планов запуска производства;
- конструкторско-технологической подготовке производства к строительству;
- анализе технологичности конструкций и оборудования;
- определении критерия качественной оценки производственного процесса;
- разработке технологических процессов нестандартного оборудования и оснастки;
- определении потребности в материально-технических ресурсах.

Технологическая последовательность постройки ПЭБ осуществляется в соответствии с «Укрупненным графиком проектирования и постройки». Для постройки ПЭБ оптимальным является блочно-секционный метод, который позволяет параллельно изготавливать секции с последующим укрупнением в блоки в условиях цеха. Для снижения трудоемкости корпусных работ при постройке ПЭБ и переноса большей части работ в крытые цеха формирование корпуса предпочтительно выполнять пирамидальным способом с предварительной погрузкой крупногабаритного оборудования, начиная в районе миделя, и далее выполняя сборку секций в сторону носа и кормы.

В этой связи целью данного исследования является проведение анализа организационно-технологических мероприятий в процессе строительства ПЭБ. При разработке основных положений исследования использован опыт постройки ПЭБ «Академик Ломоносов», а также ПЭБ находящейся в настоящее время на стадии строительства с применением метода *распределенной верфи*. Продолжением данного исследования являются результаты [6], предложенные в виде многоуровневой системы обеспечения надежности судовых механических систем на этапах жизненного цикла, которые включают управление надежностью, изучение остаточного ресурса и проведение оценки рисков.

Методы и материалы (Methods and Materials)

Строительство и эксплуатация ПЭБ предполагает значительную технологическую проработку [7] на всех этапах проектирования и производства, включая оценку рисков по вариантам компоновки. Наиболее приемлемым является вариант ПЭБ, отвечающий перспективным по технологическим и экономическим характеристикам корпуса [8] с учетом применения стандартных и безопасных конструктивных решений реактора.

Судовые корпусные конструкции называют *технологичными*, если в полной мере можно использовать для изготовления наиболее экономичный технический процесс, сократить длительность технологической подготовки, повысить качество изготовления, снизить трудоемкость, уменьшить количество брака, повысить правильность проектных решений. Необходимо также учитывать возможную технологию сборки и сварки корпусных конструкций [9].



Рис. 1. Внешний вид плавучего энергоблока «Академик Ломоносов»
(https://www.rosenergoatom.ru/stations_projects/sayt-pates/)

Строительство ПЭБ представляет собой основные организационно-технологические мероприятия по реализации размещения производства. Планирование строительства предпочтительно проводить позиционным способом с выполнением определенных групп технологических операций (табл. 1). В данном исследовании для постройки ПЭБ было рассмотрено порядка десяти различных технологических позиций.

Таблица 1

Технологические позиции производства при строительстве ПЭБ

Технологические позиции производства	Основные технологические операции при постройке
Позиция № 1 — плаз завода-строителя, технологические службы	1. Получение и формирование плазовых работ по корпусу. 2. Выполнение технологической подготовки производства.
Позиция № 2 — складское хозяйство	1. Получение заказанных материалов и оборудования. 2. Выполнение операций по входному контролю материалов.
Позиция № 3 — корпусообрабатывающее производство	1. Предварительная обработка металла. 2. Изготовление деталей корпуса.
Позиция № 4 — корпусно-сварочное производство	1. Выполнение сборки и сварки узлов деталей корпуса. 2. Изготовление (сборка и сварка) секций корпуса.
Позиция № 5 — стапельно-сдаточное производство	1. Формирование носового, кормового, среднего блоков секций. 2. Формирование корпуса ПЭБ из блоков секций. 3. Вывод ПЭБ к достроечной набережной.
Позиция № 5 — судомонтажное производство	1. Монтаж части механизмов и оборудования.
Позиция № 6 — стендовый участок	1. Получение новых тепловыделяющих сборок (НТВС). 2. Подготовка НТВС.
Позиция № 7 — производство специальной энергетики	1. Изготовление баков МВЗ. 2. Изготовление секций ЗО с бетоном. 3. Сборка парогенерирующего блока.
Позиция № 8 — достроечная набережная	1. Выполнение монтажных и достроечных работ, не выполненных на предыдущих позициях. 2. Испытания защитных оболочек (ЗО) на прочность и герметичность. 3. Проведение швартовных испытаний.

Развитие организационно-технических мероприятий в виде программ управления технологичностью строительства судна позволит осуществлять оценку проектных решений с учетом технологии постройки, сборки корпусных конструкций, монтажа механических систем и проведения приемо-сдаточных испытаний в построечный период.

Результаты (Results)

Для устранения дублирования требований общего характера в целях унификации выполнения технологических позиций производства предлагается разработать общие технические требования (ОТТ), предъявляемые к изготовлению, материалам, контролю качества и испытаниям конструкций корпуса и надстройки, конструкций ЗО, баков металловодной защиты, дельных вещей; монтажу механизмов и трубопроводов судовых механических систем.

На рис. 2 показано существующее представление о нарастании технологической готовности строительства ПЭБ по технологическим позициям производства завода-строителя. Однако на практике каждый из технологических этапов строительства может иметь отклонение по структуре продолжительности на основе двух сценариев: *оптимистичного*, наиболее вероятного, и *пессимистичного*, который рассчитывается на основе набора вероятностей. Такой подход уже не будет являться дискретным, он определяется на основании вероятностных сценариев производства (наиболее близким методом расчетной оценки является так называемый PERT/COST) [10].

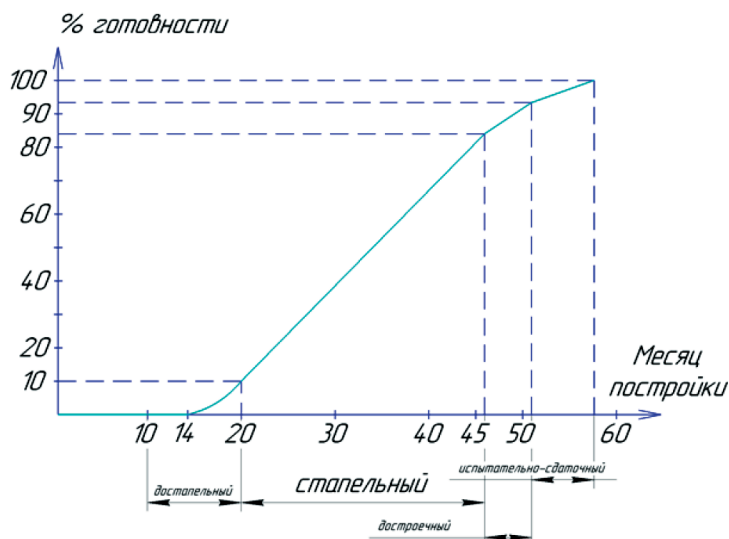


Рис. 2. График нарастания технологической готовности

При разработке конструкторской документации проектант стремится создать конструкции, обладающие прочностью и надежностью в эксплуатации, однако по разным причинам недостаточное внимание уделяется вопросам технологичности конструкций (например, неверно подобраны узлы сварных соединений, не сохраняется доступность мест для монтажа и т. п.).

Секции корпуса и надстройки представляют собой технологическую единицу для сборки блока секций, которые предпочтительно проводить исходя из сокращения сроков и трудоемкости постройки, перенесения основного объема работ в цеховые условия, возможностей грузоподъемного и транспортного оборудования завода-строителя. Для снижения количества монтажных сварных соединений предпочтительно применять листовой прокат, исходя из длины 12 м, с учетом припусков на разделку. В случае конструктивной целесообразности применять листовой прокат, исходя из длины 8 м.

На этапе технического проекта предлагается расчет масс секций выполнять методом удельных показателей, при котором масса корпусных конструкций соответствует «Нагрузке масс и положения центра тяжести судна порожнем». Распределение масс корпусных конструкций по секциям опреде-

ляется путем отношения усредненной массы 1 м^2 корпусной конструкции к площади конструкции рассчитываемой секции. Точную массу определять на этапе выпуска рабочих чертежах секций.

Согласно п. 1.7.4.4, ч. II «Правил классификации и постройки морских судов»³ (далее — Правила) сварные стыки и пазы должны располагаться в наименее напряженных сечениях конструкции, по возможности на расстоянии не менее 200 мм от мест сечения рамных связей, вырезов и мест линий слома палуб. Согласно п. 1.4.8.3, ч. II Правил допускается попадание монтажных стыков и пазов в радиус скругления выреза, не превышающих размер $2,5 \times 1,2 \text{ м}$. В таком случае вырез предлагается вскрывать на построечном месте. Однако в случае, обусловленном конструктивной особенностью попадания сварных соединений на линии вырезов, не относящемся к расчетной палубе и реакторно-му отсеку, предлагается для минимизации концентраций внутренних напряжений предусматривать припуск исходя из выражения $R1 = R2 - 100 \text{ мм}$ для выполнения скругления выреза (рис. 3). После этого «забойный» участок радиуса $R1$ можно убрать механическим способом.

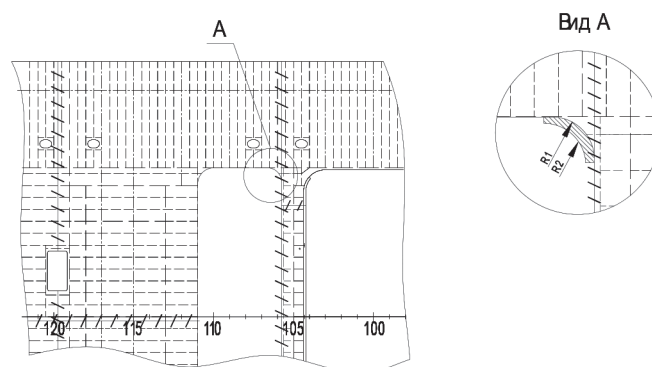


Рис. 3. Припуск для выполнения скругления выреза в составе секции

На этапе проектирования при разработке общего расположения судна предлагается ввести понятие *малые вырезы* с габаритами $2,5 \times 1,2 \text{ м}$ или менее и устанавливать на расстоянии не менее чем 0,4 м от главных продольных переборок. Большие вырезы (более $2,5 \times 1,2 \text{ м}$) необходимо выполнять на расстоянии не менее чем 1 м от основных поперечных переборок (рис. 4). Для обеспечения технологичности сборки секций не следует расстыковывать сварными стыками места в районе между большими вырезами.

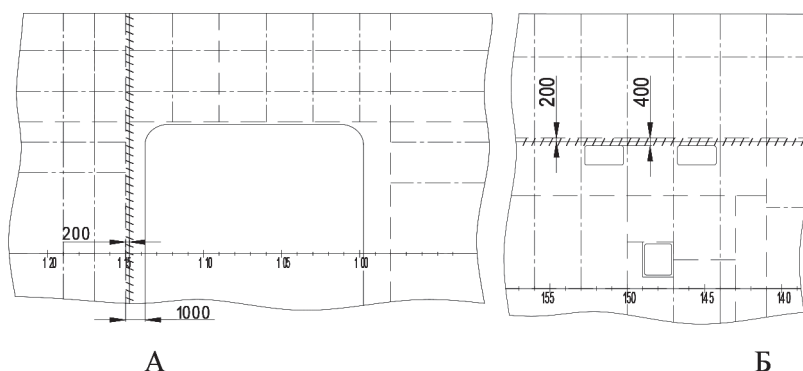


Рис. 4. Расположение вырезов в составе секции

Для унификации проектирования и строительства типовых деталей и узлов элементов корпуса необходимо разрабатывать альбомы типовых корпусных конструкций. Размеры этих элемен-

³ Правила классификации и постройки морских судов. Часть II: «Корпус». НД № 2–020101–174. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://lk.rs-class.org/regbook/getDocument2?type=rules3&d=F7B044E5-3A62-40E1-BDFF-03A6573D2BD3&f=2-020101-174-2>.

тов даны без учета припусков и зазоров под сварку. Правила выполнения таких альбомов типовых конструкций в судостроении изложены в отраслевых стандартах. Необходимо создание национальных стандартов для оформления конструкторской документации в едином стиле для определения параметров и особенности узлов конструкций.

Процесс сварки можно разделить на следующие составляющие: геометрия сварного шва, сварочные материалы, технология сварки, контроль сварных соединений. При разработке чертежей для сборки и сварки конструкций предпочтительно разрабатывать следующие альбомы сварных соединений конструкций: углеродистые и низколегированные стали, стали высокой прочности, коррозионно-стойкой стали. Предлагается отображать в альбомах геометрию сварных узлов, рассматривать сварочные материалы, ограничивать сварные узлы, необходимые для завода-строителя. Технологию сварки ведет завод-строитель, который разрабатывает технологические карты и согласовывает их с Российским морским регистром судоходства (РС). Для оценки работоспособности сварного соединения проводятся исследования совместно с специализированной металлургической организацией.

Необходимо отметить, что категория сварных швов зависит от ответственности конструкций для назначения объема контроля. Сварные швы с полным проваром назначаются в зависимости от прочности конструкций, установленной для проведения работ в условиях циклической нагрузки. Непровары сварных швов влияют на статические нагрузки за счет ослабления сечения. Усиление сварного шва проводится для получения равной прочности с основным металлом, однако увеличенное усиление может приводить к риску трещин из-за концентрации напряжений.

В процессе изготовления секций проводятся операции контроля, обеспечивающие проверку геометрических параметров металлоконструкций и качество выполнения сварки на всех стадиях изготовления конструкций. Контроль геометрических параметров осуществляется с применением различного измерительного инструмента. Для выполнения контроля сварных соединений применяется специальное переносное технологическое оборудование, обеспечивающее рентгенографирование, ультразвуковой и магнитопорошковый контроль. Результаты контроля, выполненного на стадиях предварительной и объемной сборки, фиксируются в таблицах замеров и учитываются на последующих этапах изготовления корпуса.

В соответствии с последней редакцией ст. 35 Федерального закона № 162-ФЗ «О стандартизации Российской Федерации», с 1 сентября 2025 г. отраслевые стандарты утратили силу как нормативные документы по стандартизации, что требует разработки государственных, национальных или корпоративных стандартов. В соответствии с этим объем проведения контроля сварных соединений корпусных конструкций и количество контролируемых участков предлагается проводить по новым национальным стандартам, приведенным в табл. 2. В этой связи проведены исследования для изучения контроля для сварных соединений корпусных конструкций: визуальный и измерительный контроль для выявления поверхностных дефектов шва: рентгенографический — для выявления внутренних непроваров; ультразвуковой — для выявления внутренних трещин; капиллярный — для выявления поверхностных несплошностей.

Таблица 2

Неразрушающий контроль сварных соединений

Метод контроля	Объем контроля по нормативному документу, утративший силу	Объем контроля предлагаемый национальный стандарт	Предмет контроля
Визуальный и измерительный	ОСТ 5P.1093–93 100 %	ГОСТ Р ИСО 17637–2014 100 %	Углеродистые и низколегированные стали нормальной прочности, высокой прочности
Визуальный и измерительный	ОСТ 5P.9634–2015 100 %	ГОСТ Р 59023–2020 100 %	Коррозионно-стойкие стали

Таблица 2
(Окончание)

Рентгенографический и ультразвуковой	ОСТ 5P.1093 I категория — 20 % (30 %)* II категория — 5 % (10 %)* III категория — 2 % (5 %)*	ГОСТ Р ИСО 17636–2017, ГОСТ Р ИСО 17640–2016: уровни качества В, С, D согласно ГОСТу Р ИСО 5817–2025	Углеродистые и низколегированные стали нормальной прочности (высокой прочности)*
Рентгенографический и ультразвуковой	ОСТ 5P.9634–2015 I и II категории –100 %; стыковые, тавровые 20 % III категория — не производится	Требуется разработка национального стандарта	Коррозионно-стойкие стали
Капиллярный	ОСТ 5P.1093–93	ГОСТ Р ИСО 3452–2009	Углеродистые и низколегированные стали нормальной прочности, высокой прочности
Капиллярный	ОСТ 5P.9634–2015	Требуется разработка национального стандарта	Углеродистые и низколегированные стали нормальной прочности, высокой прочности

С целью систематизации сведений испытаний трубопроводов, изготовленных из углеродистой стали по параметрам проводимой среды, герметичности, контроля сварных соединений, в табл. 3 показан общий вид данных для приемки и проверок трубопроводов. Из таблицы видно, что применяемые методы могут существенно отличаться и не иметь понятной связи с методами неразрушающего контроля, их перспективная унификация возможна в рамках программы национальной стандартизации путем разработки новых ГОСТов Р.

Таблица 3

Контроль сварных соединений трубопроводов

Проводимая среда, по правилам РС (ч. VIII, разд. 1.3)	Испытания сварных соединений на герметичность по ОСТ 5.0170–81	Доступный способ контроля, МПа, по ОСТ 5.0170–81	
Трубопроводы I класса $p > 1,6$ МПа или $t > 300^{\circ}\text{C}$	III класс герметичности	$> 0,1$ МПа, люминесцентный капиллярный	$> 3,0$ МПа люминесцентно-гидравлический
Трубопроводы II класса, не указанное для I и III классов	IV класс герметичности	$0,1$ МПа, люминесцентный капиллярный	$> 2,0$ МПа люминесцентно-гидравлический
Трубопроводы III класса $p < 0,7$ МПа или $t > 200^{\circ}\text{C}$	V класс герметичности	$< 0,1$ МПа, цветной капиллярный	$0,2$ – $2,0$ МПа, гидравлический

При судомонтажном производстве трудоемкой операцией является повышенный объем пригоночных и разметочных работ, которые требуют совершенствования с применением цифровых измерительных средств. Кроме того, предлагается разработка перечня крупногабаритного оборудования и схемы транспортировки, для которых потребуется производить вырезы в корпусных конструкциях.

В соответствии с разд. 3.3, ч. VIII Правил допускаются применение трубопроводов из пластмасс в зависимости от местоположения, проводимых сред и огнестойкости. Внедрение таких видов материалов находят отражение в коммерческом судостроении и военных малых кораблей. Однако при проектировании атомных судов такие решения не находят развития по разным причинам. В принципе, если выполнить требования к морозостойкости, температурной и химической стойкости, низкой горючести, экологии, запасу прочности, то можно применять пластиковые трубы внутри судна для механических систем водоснабжения, отопления, кондиционирования, сжатого воздуха, балластной, сточной и других подобных системах. Кроме того, снижается весовая нагрузка на судно, пластик не подвергается коррозии, не требуется покраска, обеспечивается удобство монтажа, что косвенно снижает затраты строительства судна.

В соответствии с п. 2.4.2.1.1, ч. II «Правил технического наблюдения за судами в эксплуатации»⁴ в течение пяти лет требуется проводить не менее двух освидетельствований подводной части судна. Для защиты поверхностей подводной части корпусных конструкций от внешних воздействий (воды, коррозии, температур, вредных веществ) в настоящее время используют лакокрасочные покрытия, которые удовлетворяют условиям эксплуатации и обеспечиваются восстановлением в междоковый период не менее 10 лет. В этой связи предлагается совмещать докование, освидетельствование подводной части судна и лакокрасочных покрытий с продлением до 10 лет.

На рис. 5 приведена принципиальная схема реакторного отсека атомного судна. В составе корпуса предусмотрены две защитные оболочки (ЗО), представляющие собой выгородки прочно-герметичного контура для экологической безопасности, внутри которых размещено оборудование реакторной установки. Нижняя часть ЗО является опорной поверхностью для бака металловодной защиты, который представляет собой герметичную коробчатую конструкцию с цилиндрическими кессонами и патрубками подвода-отвода охлаждающей среды. Так же реакторный отсек локализуется защитным ограждением (з.ог) для дополнительного ограничения утечки радиоактивных веществ в другие части судна и в окружающую среду, выполненные герметичными конструкциями.

Научные исследования испытаний замкнутых контуров проводят отраслевые организации, в части прочности — ФГУП «КГНЦ», герметичности — АО «ЦТСС», на основе которых проектант судна разрабатывает методики испытаний. Кроме того, в работе [11] предлагается ряд способов повышения чувствительности контроля относительно скорости утечки, анализ математических моделей традиционных способов контроля, автоматизация технологии испытаний ЗО атомных объектов морской техники.

Тем не менее недостаточно уделяется значениям в оценке организационно-технологических мероприятий последовательности данных испытаний. В частности, согласно п. 3.2.10, ч. III «Правил классификации и постройки атомных судов» испытания ЗО на прочность могут совмещаться с испытанием на герметичность при доведении рабочих давлений проводимые воздухом. Однако по опыту прошлых проектов атомных судов завод-строитель по ряду причин не успевает собрать все элементы механических систем, и проводятся отдельные испытания на прочность и герметичность. Такой способ влечет повторяющиеся технологические операции по подготовке объемов, разработки отдельных методик и согласований их с заинтересованными участниками организаций, что косвенно влияет на увеличения сроков постройки судна.

Кроме того для з.ог предъявляются нормы герметичности в объеме обычных требований к судовым помещениям. Испытания на герметичность контуров производятся на основании схемы испытаний корпуса на водонепроницаемость. В настоящее время проводят испытания для каждого помещения, соприкасающегося со стенкой з.ог. Отчасти такой подход позволяет последовательно вести формирование помещений и одновременно проводить их испытания. Однако такой способ влечет за собой повторяющиеся технологические операции по подготовке нескольких десятков помещений

⁴ Правила технического наблюдения за судами в эксплуатации (часть II) / НД № 2–020201–031. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://lk.rs-class.org/regbook/getDocument2?type=rules3&d=757AFA04-61BF-464F-94F6-E800A717F552&f=2-020201-031>.

в составе з.ог. В принципе, проводить испытание одновременно всего отсека можно для снижения времени и затрат даже в случае разделения объемов испытаний по отдельным палубам с заглушением проходов тамбуров, участков каналов вентиляции и подобных замкнутых конструкций.

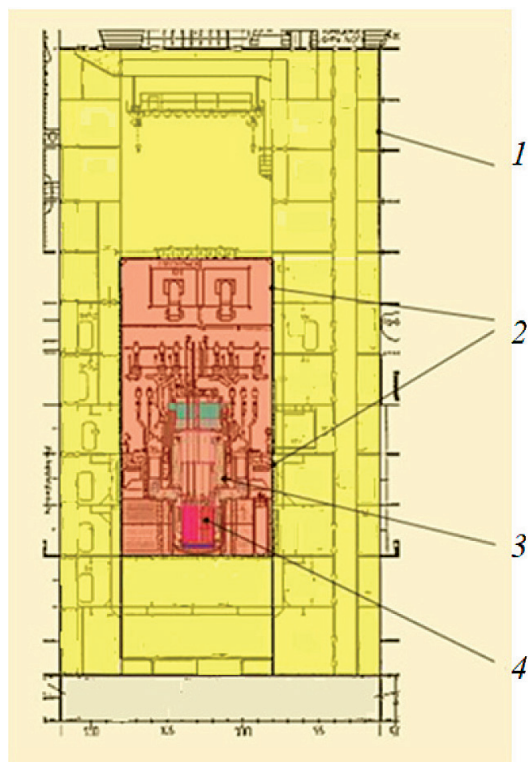


Рис. 5. Принципиальная схема физических барьеров обезличенного реакторного отсека атомного судна (из материалов АО «ЦКБ «Айсберг»:
1 — защитное ограждение — водогазонепроницаемая корпусная конструкция, препятствующая распространению радиоактивных веществ в помещения судна и окружающую среду;
2 — защитная оболочка — водогазонепроницаемая корпусная конструкция, препятствующая распространению за ее пределы РВ и парогазовой смеси;
3 — корпус реактора, препятствующий распространению РВ при разгерметизации ТВЭЛ;
4 — оболочка ТВЭЛ, препятствующая попаданию продуктов деления топлива

По объективным причинам необходимо совершенствовать управление проектами в судостроительном производстве с внесением дополнений в сетевые графики о готовности строительства судна. Первым шагом в этом направлении предлагается определение организационно-технических мероприятий в виде выпуска программы управления технологичностью строительства судна, общий вид которой приведен в табл. 4.

Таблица 4

**Предлагаемые организационно-технические мероприятия
программы управления технологичностью**

Технические мероприятия по управлению технологичностью	Нормативные и организационно-методические документы	Конструкторско-технологические документы
Техническое обеспечение строительства	ОСТ 5Р.0718–2003 «Техническое обеспечение строящихся, ремонтируемых и переоборудуемых судов»	Технологическое обеспечение средами ТОС
Технология постройки	РД 5.0381 «Принципиальная технология и организация постройки кораблей и судов»	Проектная технология и организация постройки

Таблица 4
(Окончание)

Технические требования к технологическим документам	РД 5Р.0378–92 «Технологические документы судостроительной верфи»	ОТТ в области технологии и организации судостроительного производства
Технические требования к конструкторским документам	ГОСТ 23888–79 – ГОСТ 23897–79 «Рабочие конструкторские документы судостроительной верфи. Основные требования»	ОТТ к конструкциям корпуса и надстройки; конструкций ЗО и баков МВЗ; дельные вещи; монтаж механизмов; трубопроводов механических систем.
Разбивка судна на построечные единицы	НД 2–020101–174 «Правила классификации и постройки морских судов», часть II, изд. 2025; ОСТ 5Р.9613 «Технические требования к проверочным работам при изготовлении на построечном месте»	Схема разбивки корпуса и надстройки на построечные единицы
Приемо-сдаточные испытания в построечный период	НД 2–030101–033 «Руководство по техническому наблюдению за постройкой судов», изд. 2019	Перечень удостоверений приемок и проверок в построечный период
Унификация корпусных конструкций	РД 5.036–85 «Система унификации в судостроении. Порядок разработки альбомов типовых конструкций»	Рабочий альбом типовых корпусных конструкций
Сварка и сборка корпусных конструкций	ГОСТ 5264–80 «Ручная дуговая сварка. Соединения сварные. Основные типы, конструктивные элементы и размеры»	Альбом сварных соединений конструкций корпусных конструкций: углеродистых и низколегированных сталей; стали высокой прочности; коррозионно-стойкой стали
Контроль сварных соединений	НД 2–020101–174 «Правила классификации и постройки морских судов», часть XIV, изд. 2025	Схема контроля монтажных сварных соединений корпусных конструкций; ведомость контроля внутрисекционных сварных соединений
Погрузка-выгрузка крупногабаритного оборудования	ОСТ 5Р.0737–2001 «Проектные конструкторские документы для судов. Правила выполнения, согласования (одобрения) и утверждения»	Схемой технологических вырезов для погрузки-выгрузки крупногабаритного оборудования
Испытания на прочность и герметичность ЗО	НД 2–020101–169 «Правила классификации и постройки атомных судов», часть IV, изд. 2025.	Методика проведения испытания на прочность и герметичность ЗО
Испытания на герметичность з.ог.	ОСТ 5Р.1180–93 «Методы и нормы испытаний на непроницаемость и герметичность»	Схема герметичных контуров. Таблица испытаний
Защитные лакокрасочные покрытия	ОСТ 5Р.9566–94 «Покрyтия лакокрасочные. Типовые технологические процессы окрашивания судов»	Ведомость окраски наружных и внутренних поверхностей судна; технологический процесс выполнения малярных работ при строительстве судна

Обсуждение (Discussion)

На основе опыта имеющихся проектов строительства судов для Арктики, на российских верфях наблюдается увеличение сроков их постройки, перенос сдачи в эксплуатацию, что оказывает косвенное влияние на стоимость постройки. Преодоление этой проблемы связано с необходимостью проведения организационно-технических мероприятий для повышения технологичности строительства судов на всех этапах жизненного цикла. Данные задачи относятся не только к технологии производства корпуса, но и к энергетическим установкам судна [12], их механическим системам и движителям (пропульсивным комплексам); сохраняется задача снижения экологической нагрузки [13], так называемого *углеродного следа* от новых судов. Для новых судов, эксплуатация которых предполагается в полярных водах (Северный морской путь), важной задачей является повышение общей надежности [14], уточнение, в том числе классификационное, мощности судов высокого ледового класса [15] и реализация задач развития судоремонта [16].

Заключение (Conclusion)

Выполненное исследование вносит дополнения в теоретические основы технологии строительства судов различного назначения. Получены достаточно точные зависимости и определены организационно-технологические мероприятия постройки судна. Предложенные на основе результатов данного исследования меры не являются исчерпывающими.

Полученные зависимости позволяют сделать следующие основные выводы:

- совершенствование организационно-технологических мероприятий должно становиться постоянным процессом для производственной деятельности постройки ПЭБ, может дополняться при изменяемых условиях над новыми проектами судов.
- рассмотренные в работе принципы технологичности могут служить универсальным подходом при поиске путей повышения эффективности строительство ПЭБ.
- оптимизация предлагаемых технологических документов рассматривается для применения возможного планирования, объединить на единой программной платформе процесс этапов проектирования и строительства.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Зверев Д. Л. АО «ОКБМ Африкантов» — научно-производственный центр атомного машиностроения. 75 лет в атомной отрасли / Д. Л. Зверев, В. В. Петрунин, С. В. Бабушкин [и др.] // Атомная энергия. — 2020. — Т. 129. — № 1. — С. 3–13. — EDN AIJYQE.
2. Саркисов А. А. Перспективы использования атомных энергетических технологий в Арктике / А. А. Саркисов, Д. О. Смоленцев, С. В. Антипов [и др.] // Арктика: экология и экономика. — 2022. — Т. 12. — № 3. — С. 349–358. DOI: 10.25283/2223-4594-2022-3-349-358. — EDN CENAAX.
3. Александров М. В. К вопросу инновационного развития судостроения Российской Федерации / М. В. Александров, Ю. М. Габдрафиков, В. Н. Половинкин [и др.] // Судостроение. — 2023. — № 3(868). — С. 3–11. — EDN KUOXOG.
4. Савченко О. В. Современное состояние, проблемы и перспективы развития отечественного гражданского судостроения / О. В. Савченко, В. Н. Половинкин // Судостроение. — 2022. — № 3(862). — С. 3–10. — EDN OWXJLN.
5. Лисицкий В. В. Перспективы внедрения новейших технологий на предприятиях АО «Южный центр судостроения и судоремонта» / В. В. Лисицкий, А. А. Васильев, К. Д. Могилко [и др.] // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Морская техника и технология. — 2023. — № 2. — С. 41–46. DOI: 10.24143/2073-1574-2023-2-41-46. — EDN MVQSIP.
6. Мосейко Е. С. Многоуровневая система обеспечения надежности судовых механических систем на этапах жизненного цикла / Е. С. Мосейко, Е. О. Ольховик, В. Ю. Рудь // Вестник государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2024. — Т. 16. — № 5. — С. 775–783. DOI: 10.21821/2309-5180-2024-16-5-775-783. — EDN FFKEEK.
7. Jurewicz J. M. Design and construction of an offshore floating nuclear power plant. — Massachusetts Institute of Technology, 2015. [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://dspace.mit.edu/handle/1721.1/103707> (дата обращения: 12.12.2025).

8. J. Buongiorno The Offshore Floating Nuclear Plant Concept / J. Buongiorno, J. Jurewicz, M. Golay, N. Todreas // *Nuclear Technology*. — 2016. — Т. 194. — № 1. — С. 1–14. DOI: 10.13182/NT15-49.
9. Лебедева Е. Г. Обеспечение технологичности судовых корпусных конструкций при создании электронной модели / Е. Г. Лебедева, А. А. Сомпольцева // *Морские интеллектуальные технологии*. — 2020. — № 3–1(49). — С. 102–109. DOI: 10.37220/MIT.2020.49.3.013. — EDN WSSUKO.
10. Wei N.-C. Earned value management views on improving performance of engineering project management. / N.-C. Wei, C.-P. Bao, S.-Y. Yao, P.-S. Wang // *International Journal of Organizational Innovation*. — 2016. — Vol. 8. — Is. 4.
11. Веселков В. В. Принципы реализации и развития технологии автоматизированного изготовления корпусных конструкций / В. В. Веселков, М. А. Кобец // *Вестник государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова*. — 2015. — № 1(29). — С. 82–89. DOI: 10.21821/2309-5180-2015-7-1-82-89. — EDN TKJMXL.
12. Гулый В. А. Некоторые предложения по совершенствованию системы парораспределения главного турбоагрегата атомного ледокола проекта 22220 / В. А. Гулый, В. В. Кондратьев // *Научно-технический сборник Российского морского регистра судоходства*. — 2025. — № 79. — С. 137–147. — EDN WRURVX.
13. Реуцкий А. С. Оценка влияния типа используемого судового топлива на величину углеродного следа транспортной услуги / А. С. Реуцкий, В. В. Якимов, А. А. Буцанец // *Научно-технический сборник Российского морского регистра судоходства*. — 2024. — № 76. — С. 87–95. — EDN ICJSDQ.
14. Мосейко Е. С. Применение структурных методов для оценки надежности судовых механических систем / Е. С. Мосейко, Е. О. Ольховик, В. Г. Никифоров // *Вестник государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова*. — 2023. — Т. 15. — № 5. — С. 834–844. DOI: 10.21821/2309-5180-2023-15-5-834-844. — EDN NBOOCB.
15. Добродеев А. А. Какой должна быть мощность крупнотоннажного судна для работы в восточном секторе Арктики? / А. А. Добродеев, К. Е. Сазонов // *Арктика: экология и экономика*. — 2024. — Т. 14. — № 3(55). — С. 427–436. DOI: 10.25283/2223-4594-2024-3-427-436. — EDN FFIOOH.
16. Рогов А. З. Перспективы развития судоремонта на Дальнем Востоке / А. З. Рогов, С. А. Огай, А. С. Огай // *Вестник Инженерной школы Дальневосточного федерального университета*. — 2025. — № 1(62). — С. 89–104. DOI: 10.24866/2227-6858/2025-1/89-104. — EDN EGMTGF.

REFERENCES

1. Zverev, D. L., V. V. Petrunin, S. V. Babushkin et al. “JSC “Afrikantov Okbm” — scientific and manufacturing center of nuclear engineering. 75 years of working in nuclear industry.” *Atomic Energy* 129.1 (2020): 3–13.
2. Sarkisov, A. A., D. O. Smolentsev, S. V. Antipov et al. “Prospects of using nuclear power technologies in the arctic.” *Arctic: Ecology and Economy* 12.3 (2022): 349–358. DOI: 10.25283/2223-4594-2022-3-349-358.
3. Aleksandrov, M. V., Yu. M. Gabdrifkov, V. N. Polovinkin et al. “Regarding innovative development of shipbuilding in the Russian Federation.” *Shipbuilding* 3(868) (2023): 3–11.
4. Savchenko, O. V. and V. N. Polovinkin. “Current state, problems and prospects for development of domestic ship building industry.” *Shipbuilding* 3(862) (2022): 3–10.
5. Lisitskiy, V. V., A. A. Vasil’ev, K. D. Mogilko et al. “Prospects for introducing advanced technologies at enterprises of southern center of shipbuilding and ship repair, JSC.” *Vestnik of Astrakhan State Technical University. Series: Marine Engineering and Technologies* 2 (2023): 41–46. DOI: 10.24143/2073-1574-2023-2-41-46.
6. Moseyko, E. S., E. O. Ol’khovik and V. Yu. Rud’. “A multi-level system for ensuring the reliability of marine mechanical systems at the stages of the life cycle.” *Vestnik gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 16.5 (2024): 775–783. DOI: 10.21821/2309-5180-2024-16-5-775-783.
7. Jurewicz J. M. Design and construction of an offshore floating nuclear power plant. — Massachusetts Institute of Technology, 2015. Web. December 12, 2025 < <https://dspace.mit.edu/handle/1721.1/103707> >.
8. Buongiorno, J., J. Jurewicz, M. Golay and N. Todreas. “The Offshore Floating Nuclear Plant Concept.” *Nuclear Technology* 194.1 (2016): 1–14. DOI: 10.13182/NT15-49.
9. Lebedeva, E. G. and A. A. Sompol’tseva. “Ensuring the technological capability of ship hull structures when creating an electronic model.” *Marine Intelligent Technologies* 3–1(49) (2020): 102–109. DOI: 10.37220/MIT.2020.49.3.013.
10. Wei, N.-C., C.-P. Bao, S.-Y. Yao and P.-S. Wang. “Earned value management views on improving performance of engineering project management.” *International Journal of Organizational Innovation* 8.4 (2016).

11. Veselkov, V. V. and M. A. Kobets. "Printsiipy realizatsii i razvitiya tekhnologii avtomatizirovannogo izgotovleniya korpusnykh konstruksiy." *Vestnik gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 1(29) (2015): 82–89. DOI: 10.21821/2309-5180-2015-7-1-82-89.

12. Gulyy, V. A. and V. V. Kondrat'ev. "Some suggestions for improving the steam distribution system of the main turbine unit of the nuclear icebreaker project 22220." *Research Bulletin by Russian Maritime Register of Shipping* 79 (2025): 137–147.

13. Reutskiy, A. S., V. V. Yakimov and A. A. Butsanets. "Assessment of the impact of the type of marine fuel used on the carbon footprint of the transport service." *Research Bulletin by Russian Maritime Register of Shipping* 76 (2024): 87–95.

14. Moseyko, E. S., E. O. Ol'khovik and V. G. Nikiforov. "Application of structural methods to assess the reliability of ship's mechanical systems." *Vestnik gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 15.5 (2023): 834–844. DOI: 10.21821/2309-5180-2023-15-5-834-844.

15. Dobrodeev, A. A. and K. E. Sazonov. "What should be the power capacity of a supership to operate in the eastern part of the arctic?" *Arctic: Ecology and Economy* 14.3(55) (2024): 427–436. DOI: 10.25283/2223-4594-2024-3-427-436.

16. Rogov, A. Z., S. A. Ogay and A. S. Ogay. "Prospects for the development of ship repair in the far east." *Fefu: School of Engineering Bulletin* 1(62) (2025): 89–104. DOI: 10.24866/2227-6858/2025-1/89-104.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Мосейко Евгений Сергеевич —
инженер-технолог отдела технологии,
экономики производства,
нормирования материалов
АО «Центральное конструкторское бюро
«Айсберг»
199034, Российская Федерация, Санкт-Петербург,
Большой пр., 36
e-mail: evgeniy-moseyko@mail.ru
Ольховик Евгений Олегович —
доктор технических наук, доцент
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала
С. О. Макарова»
198035, Российская Федерация, Санкт-Петербург,
ул. Двинская, 5/7
e-mail: olhovikeo@gumrf.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Moseyko, Evgeniy S. —
Process Engineer
of the Department of Technology,
Industrial Economy
and Materials Rationing
"Iceberg" Central Design Bureau
36 Bol'shoi Ave., St. Petersburg,
199034, Russian Federation
e-mail: evgeniy-moseyko@mail.ru
Olhovik, Evgeniy O. —
Grand PhD in Technical Sciences, associate professor
Admiral Makarov State University of Maritime
and Inland Shipping
5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg, 198035,
Russian Federation
e-mail: olhovikeo@gumrf.ru

Статья поступила в редакцию 19 ноября 2025 г.

Received: Nov. 19, 2025

MAIN DIRECTIONS AND PROSPECTS FOR THE DEVELOPMENT OF MARINE TWO-STROKE CROSS-HEAD LOW-SPEED ENGINES

G. E. Zhivljuk, A. P. Petrov

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

Low Low-speed two-stroke cross-head engines remain dominant among the power units that provide propulsion for large-capacity merchant vessels. This article examines the main directions and prospects for improving marine two-stroke low-speed engines. Based on the consideration of general design principles, the primary areas of focus are fuel efficiency, environmental safety, and operational reliability. Despite the high thermodynamic efficiency of the engine cycle, there remain reserves for further reducing specific fuel consumption by minimizing internal losses and maximizing the utilization of exhaust gas energy. The study addresses environmental aspects of marine diesel power plants based on low-speed engines and outlines the prospects for various technologies to comply with current regulations on limiting harmful emissions from exhaust gases. Key areas of development for reducing nitrogen oxide emissions include direct control of in-cylinder combustion processes, exhaust gas recirculation, and selective catalytic reduction. The potential of specific methods for decreasing sulfur and particulate matter emissions is also discussed. Particular attention is given to reducing greenhouse gas emissions, with the use of alternative fuels such as natural gas, methanol, and ammonia highlighted as promising solutions in the foreseeable future. The article further emphasizes the importance of operational reliability, identifying the monitoring of the technical condition of the power plant as the most effective approach. Overall, the paper provides an integrated perspective on improving the performance, safety, and sustainability of marine two-stroke low-speed engines, highlighting technological trends and practical solutions for decarbonization, emission control, and enhanced reliability of large-scale marine propulsion systems.

Keywords: low-speed, two-stroke engine, cross-head, design fundamentals, trends, development prospects, efficiency, environmental safety, decarbonization, reliability, alternative fuels.

For citation:

Zhivljuk, Grigorij E. and A. P. Petrov. "Main directions and prospects for the development of marine two-stroke cross-head low-speed engines." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admiral S. O. Makarova* 18.1 (2026): 112–127. DOI: 10.21821/2309-5180-2026-18-1-112-127.

УДК 629.12

ОСНОВНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ СУДОВЫХ ДВУХТАКТНЫХ КРЕЙЦКОПФНЫХ МАЛООБОРОТНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

Г. Е. Живлюк, А. П. Петров

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

Темой исследования являются малооборотные двухтактные крейцкопфные двигатели, которые занимают доминирующее положение среди агрегатов, обеспечивающих энергией движение крупнотоннажных морских судов торгового флота. В статье описаны перспективы и основные направления совершенствования судовых двухтактных малооборотных двигателей. На основе рассмотрения общих принципов конструкции в качестве главных направлений выделены: экономичность, экологическая безопасность и надежность. Отмечается, что несмотря на высокую степень термодинамического совершенства цикла, остаются некоторые резервы для достижения более низких уровней удельного эффективного расхода топлива за счет сокращения внутренних потерь в двигателе и глубокой утилизации энергии отработавших газов. В работе рассмотрены экологические аспекты работы судовой дизельной энергетической установки на основе малооборотного двигателя и отмечены перспективы различных технологий в достижении действующих требований по ограничению выбросов вредных компонентов из состава отработавших газов. Выделены основные

направления в развитии технологий сокращения эмиссии оксидов азота, среди которых непосредственное воздействие на протекание внутрицилиндровых процессов, рециркуляция отработавших газов и селективное каталитическое восстановление. Также рассмотрены перспективы применимости отдельных способов борьбы с выбросами соединений серы и твердых частиц. Отдельное внимание в работе уделено проблемам сокращения выбросов парниковых газов, в качестве наиболее перспективных в обозримом будущем тенденций выделено использование альтернативных топлив: природного газа, метанола и аммиака. В рамках настоящей работы затронуты вопросы наиболее эффективного способа повышения надежности эксплуатации — мониторинга технического состояния энергетической установки.

Ключевые слова: малооборотный двухтактный двигатель, крейцкопф, основы конструкции, тенденции, перспективы развития, тепловые потери, экономичность, экологическая безопасность, декарбонизация, топливо альтернативное, надежность.

Для цитирования:

Живлюк Г. Е. Основные направления и перспективы развития судовых двухтактных крейцкопфных малооборотных двигателей / Г. Е. Живлюк, А. П. Петров // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2026. — Т. 18. — № 1. — С. 112–127. DOI: 10.21821/2309-5180-2026-18-1-112-127. — EDN WHUZQX.

Введение (Introduction)

Малооборотные двухтактные крейцкопфные двигатели являются наиболее распространенными источниками энергии в составе пропульсивной установки большинства крупнотоннажных торговых судов¹. Благодаря внушительным размерам цилиндра такие двигатели обеспечивают минимизацию тепловых потерь в цикле и, как следствие, достижение самых высоких показателей по топливной экономичности среди используемых типов тепловых двигателей. Низкая частота вращения коленчатого вала двигателя и относительно простое реверсирование направления вращения коленчатого вала позволяют использовать двухтактный двигатель для непосредственного соединения с гребным винтом без редуктора и муфт, тем самым способствуя минимизации потерь в передаче мощности к движителю [1–3].

Значительное время, выделяемое на протекание процессов тепловыделения в малооборотном двигателе, позволяет использовать самое дешевое остаточное топливо, а развитые объемы камеры сгорания при увеличенных значениях хода поршня способствуют высокой эффективности протекания этих процессов. Таким образом, двухтактные малооборотные двигатели способны более эффективно сжигать тяжелое топливо, чем это происходит в камере сгорания среднеоборотных двигателей.

В среднеоборотных тронковых двигателях для смазки цилиндропоршневой группы и подшипников скольжения в механизмах используется одно масло, что неизбежно приводит к некоторому компромиссу в отношении его свойств. Напротив, в крейцкопфном двигателе существует четкое разграничение между картером и цилиндром. Следовательно, для смазки подшипников может использоваться рециркулирующее чистое масло с набором специфических свойств, а для смазки поршней и гильз — отдельное расходное цилиндрическое масло, подаваемое лубрикаторной системой в дозированном количестве в определенное место и время цикла. При этом цилиндрическая смазка благодаря своим свойствам позволяет эффективно бороться с кислотными остатками продуктов сгорания, тем самым повышая ресурс использования масла, циркулирующего в картерном пространстве.

Благодаря большим размерам цилиндра, при равенстве рабочих объемов, малооборотный двигатель, как правило, имеет меньшее число цилиндров, чем среднеоборотный двигатель, и, следовательно, меньшее количество подвижных деталей, что, в принципе, предопределяет более высокую общую надежность и повышенный ресурс конструкции. На общем фоне явных преимуществ малооборотных крейцкопфных двухтактных двигателей, их недостатки, выраженные в большом весе, начальной стоимости, габаритах и требованиях к занимаемому пространству,

¹ UNCTAD/RMT/2023 (Overview). Обзор морского транспорта. 2024 год / Конференция ООН по торговле и развитию — Организация Объединенных Наций, Женева, 2024 год. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://unctad.org/publication/review-maritime-transport-2024>.

становятся менее существенными, особенно если рассматривать судовую энергетическую установку в целом, а не ее отдельно взятые компоненты и, в частности, двигатель.

Целью работы является определение перспектив и основных направлений дальнейшего развития судовых малооборотных крейцкопфных двухтактных двигателей как одного из самых энергоэффективных решений в судовой энергетике.

Методы и материалы (Methods and Materials)

Общие принципы конструкции. Вне зависимости от производителя, все современные малооборотные двигатели имеют много общего в конструкции и способе организации рабочего процесса [2–4]. Все эти двигатели двухтактные, в конструкцию их кривошипно-шатунного механизма интегрирован крейцкопфный узел, двигатели оборудованы эффективными системами свободного газотурбинного наддува, обеспечивающими высокое качество очистки цилиндров от продуктов сгорания топлива за счет прямоточно-клапанной продувки (рис. 1). Такие особенности следует рассматривать как закономерности в реализации концепции главного судового малооборотного двигателя. С увеличением размерности двигателя относительное преимущество двухтактного цикла над четырехтактным в удельной мощности становится более выраженным, перекрывая любые недостатки.

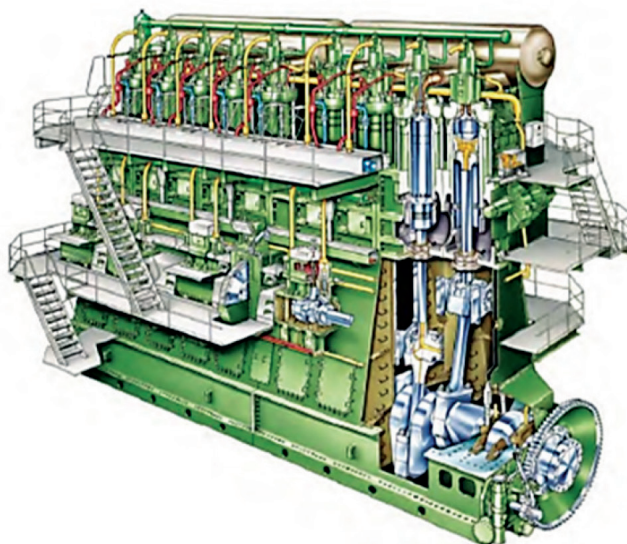


Рис. 1. Общий вид типичной конструкции малооборотного двухтактного двигателя [2]

Боковые (нормальные) силы, создаваемые в кривошипно-шатунном механизме, требуют более прочного тронка поршня, а также жестких опор для относительно тонких гильз цилиндров тронкового двигателя. Также необходимо отметить, что передача нормальных сил на стенку цилиндра всегда связана с повышенными износами в виде овализации отверстия цилиндра и, как следствие, с сокращением ресурса работы цилиндропоршневой группы. В крейцкопфном двигателе эта проблема решается путем переноса действия нормальных сил в узел крейцкопфа, разгрузки цилиндров и поршней, тем самым препятствуя образованию дополнительных износов цилиндровой втулки.

При разработке конструкции крупных двухтактных двигателей изготовитель вынужден решать несколько проектных проблем. Большой размер двигателя сам по себе не представляет особой сложности, поскольку напряжения, вызванные механическими и инерционными нагрузками в геометрически подобных двигателях разных размеров, соответствуют законам подобия, при этом возникающие термические напряжения в конструкции являются важным исключением. По мере увеличения размера цилиндра сокращается относительная площадь поверхности тепло-

отвода, вызывая рост плотности тепловых потоков при прочих равных условиях. Рост термических напряжений вынуждает конструктора прибегать к специальным решениям для разработки компонентов, способных выдерживать не только значительные механические нагрузки, но и подерживать термические напряжения на допустимом уровне.

Устранение насосных ходов поршня в двухтактном цикле создает проблемы в подшипнике верхней головки шатуна, который воспринимает однонаправленную нагрузку от суммарной силы (действие газовых сил давления и сил инерции поступательно движущихся масс поршневой группы), действующей на поршень при незначительных взаимных перемещениях деталей в подшипниковом узле. В отличие от четырехтактного двигателя, в котором под действием сил инерции в течение насосных ходов возможно естественное периодическое обновление смазки в подшипнике верхней головки шатуна, отсутствие периодов обновления масляного слоя в процессе газообмена двухтактного двигателя создает проблемы в работе подшипника, что накладывает особые требования к конструкции крейцкопфного узла. По этой же причине затруднение вызывает смазка поршневых колец, поскольку в результате отсутствия дополнительных ходов поршня не происходит обновления и плавного распределения масляной пленки на стенке цилиндра.

Все двухтактные малооборотные судовые двигатели имеют анкерную конструкцию остова, т. е. включают фундаментную раму, станину и блок цилиндров / цилиндры, что упрощает сборку. Фундаментная рама, являясь основанием, на котором собираются остальные компоненты двигателя и в которую укладывается коленчатый вал, представляет собой сварную пластинчатую конструкцию с поперечными несущими балками. На фундаментную раму устанавливаются А-образные рамы, формирующие верхний объем масляного картера — станину двигателя. А-образные рамы служат для установки направляющих крейцкопфа и опорой для блока цилиндров, изготавливаемых из серого чугуна как цельная деталь или как отдельные блоки. Гильзы цилиндров как сменные изнашиваемые в процессе эксплуатации элементы конструкции изготавливаются отдельно и устанавливаются в блок цилиндров. Цилиндры имеют водяное охлаждение с наибольшей интенсивностью в верхней зоне.

Три элемента остова: фундаментная рама, станина и блок цилиндров / цилиндры, соединены между собой анкерными связями, которые воспринимают напряжения растяжения, возникающие от сил, действующих на поршень, тем самым разгружая от них детали остова. В крышке цилиндра, которая крепится к блоку цилиндров, располагаются топливные форсунки, пусковые клапаны, индикаторные краны и др. В современных двухтактных крейцкопфных двигателях реализуют прямоточно-клапанную систему продувки цилиндров с одним выпускным клапаном. Для этого в крышку устанавливают водоохлаждаемый узел выпускного клапана с гидравлическим приводом и пневматической пружиной.

Основным компонентом группы движения является коленчатый вал. Коленчатые валы двухтактных крейцкопфных двигателей отличаются большими радиусами кривошипов, поэтому обеспечение жесткости вала за счет перекрытия шеек не представляется возможным. В результате валы оказываются весьма массивными и представляют составную конструкцию. Шатун имеет разъемы в нижней и верхней головке. Верхняя головка, в которой размещается подшипник крейцкопфа, имеет вильчатую конструкцию для обеспечения возможности крепления штока поршня к поперечине крейцкопфа. Крейцкопф имеет четыре литые направляющие ползуна (башмака) с антифрикционным баббитовым покрытием для передачи боковых усилий на остов двигателя. Поршень крейцкопфного двигателя, разгруженный от действия нормальных сил, имеет короткую чугунную направляющую для движения внутри гильзы — юбку и высокую головку с огневым днищем, формирующую камеру сгорания. Головка изготовлена из высоколегированной стали, обеспечивающей прочность и коррозионную стойкость при высоких температурах. Головка поршня воспринимает действие высоких температур сгорания, и ее поверхность может быть подвергнута эрозии или обгоранию. Поршень имеет высокую верхнюю часть, а канавки для колец расположены ниже в головке, что снижает нагрузку на кольца, возникающую при сгорании. Комплект из трех – пяти поршневых колец предотвращает прорыв продуктов сгорания в подпоршневое пространство.

Специальные покрытия на поверхности поршневых колец снижают трение, продлевая срок службы колец. В отличие от тронковых двигателей комплект поршневых колец не включает маслосъемные кольца, поскольку смазка цилиндра-поршневой группы осуществляется лубрикатором с использованием расходного цилиндрического масла. Кованый стальной шток поршня, который крепится болтами к нижней стороне поршня, соединяет его с поперечиной крейцкопфа. Сальник штока поршня отделяет собранное цилиндрическое масло, находящееся под давлением продувочного ресивера, от смазочного масла циркуляционной системы в картере и препятствует попаданию сжатого воздуха из продувочного ресивера в объем масляного картера. Поршни охлаждаются маслом, поступающим из циркуляционной системы смазки механизмов через шток поршня. В некоторых компоновках для улучшения охлаждения масло распыляется под высоким давлением на нижнюю часть головки поршня. После охлаждения масло сливается в картерное пространство по каналу в штоке поршня.

Специфика организации внутрицилиндровых процессов двухтактных двигателей такова, что они не способны работать без источника сжатого воздуха. Сжатие продувочного воздуха на большинстве эксплуатационных режимах происходит в изобарной системе свободного газотурбинного наддува, только на режимах малых мощностей задействован дополнительно механический наддув за счет автономных электроприводных воздуходувателей.

Развитие конструкции двигателей. Развитие размеров судов и ожидаемая проектная скорость судна, прогнозируемая производителями двигателей на основе анализа рынка, определяют диапазон мощности и частоты вращения коленчатого вала на начальном этапе проектирования нового двигателя. Главным параметром, определяющим принятие решений в конструировании, основанном на имеющемся опыте и способным влиять на надежность, является среднее эффективное давление. Неуклонный рост среднего эффективного давления обеспечивается ростом давления наддува путем использования высокоэффективных агрегатов — турбокомпрессоров. Среднее эффективное давление с учетом максимального давления сгорания влияет на долгосрочное состояние цилиндра, комплекта поршневых колец и термическую нагрузку поршня, гильзы, крышки цилиндра и выпускного клапана. При условии малых скоростей взаимного перемещения деталей трения (частоты вращения коленчатого вала) среднее эффективное давление определяет размер таких компонентов, как подшипник крейцкопфа, шток поршня, подшипники коленчатого вала и др. Действующие силы, оставаясь неизменными при низкой частоте вращения, влияют на толщину масляной пленки.

Двухтактные двигатели изготавливаются только как рядные, главным образом из-за их высокого отношения хода поршня к диаметру цилиндра. V-образная компоновка для большого двухтактного двигателя усложнила бы конструкцию двигателя и его техническое обслуживание. Как правило, количество цилиндров выбирается в количестве 5–8, исходя из предпочтений оператора при капитальном ремонте и техническом обслуживании, с некоторыми мерами противодействия динамическим эффектам, связанным с вибрацией корпуса двигателя под действием сил инерции и опрокидывающего момента. Меньшее число цилиндров (4–5) требует массивного маховика и может иметь ограничение пространства для достаточного объема продувочного ресивера. Большее число цилиндров обеспечивает приемлемые виброустойчивые характеристики по пульсации набегающего крутящего момента, однако вызывает проблемы в обеспечении жесткости конструкции, поэтому двигатели с количеством цилиндров, равным 14, являются большой редкостью [2].

Часть хода поршня двухтактного двигателя вблизи нижней мертвой точки, затрачиваемая на процессы газообмена, называется *потерянным ходом поршня*. Поэтому продуктивно используется только часть хода поршня, так называемый *полезный объем цилиндра*. Исходя из этого стремление разработчиков двухтактных малооборотных двигателей к увеличению отношения хода к диаметру представляется совершенно оправданным. Однако увеличение хода поршня связано с ростом скорости его движения (при постоянной частоте вращения коленчатого вала).

Согласно действующей классификации большинство двухтактных малооборотных двигателей относится к двигателям средней быстроходности со средней скоростью движения поршня,

примерно равной 8 м/с, а в некоторых конструкциях, в которых скорость превышает 9 м/с, эти двигатели переходят в разряд быстроходных. Рост скорости движения поршня приводит к более высоким потерям на трение колец и отражается на их длительной работоспособности. Кроме того, увеличение хода поршня влечет за собой увеличение ширины двигателя, необходимой для обеспечения вращения кривошипа, что в ряде случаев может оказаться проблемой.

Важное значение для длительной работоспособности поршневых колец и гильзы цилиндра имеет корректная организация системы цилиндровой смазки в плане оптимального дозирования расходного цилиндрового масла и его правильного распределения по поверхности гильзы. Не менее важной проблемой является защита поверхности гильзы от холодной коррозии. Для этого предлагается адаптивное снижение охлаждения при низких нагрузках для двигателей с целью предотвращения образования холодных зон. Для организации подачи топлива в камеру сгорания используется несколько периферийно расположенных форсунок. Многоканальные форсунки с разным размером и направлением каждого соплового отверстия предоставляют множество возможностей для оптимизации впрыска и пространственного распределения топлива в камере сгорания в целях достижения требуемого характера тепловыделения.

Материалы, используемые в компонентах двигателя, в значительной степени основаны на имеющемся опыте. Крупные двигатели почти исключительно производятся по лицензии, при этом разработчик предоставляет подробные инструкции по материалам и качеству сварных швов для элементов остова, постоянно совершенствуя технологии и используемые материалы. Стальные выпускные клапаны в перспективе предполагается заменить на клапаны, изготовленные методом горячего изостатического прессования с использованием порошковой металлургии. Подшипники скольжения с массивным баббитовым антифрикционным слоем, используемые в конструкции двигателя, обладают ограниченными возможностями по несущей способности. Внедрение подшипников скольжения на основе алюминия с повышенной грузоподъемностью в малооборотных двигателях приведет к сокращению межцилиндровых расстояний и повышению удельной мощности при снижении веса.

Перспективы развития малооборотных двигателей. Рынок судовых двигателей зависит от технологических достижений, но, что наиболее важно, от активности строительства новых судов и изменений размеров судов. Это, в свою очередь, зависит от мировой экономики и необходимости замены старых судов.

На разработку судовых двигателей оказывают влияние следующие факторы:

- стоимость сырой нефти, тяжелого топлива и дистиллятов, а также стоимость и доступность альтернативных видов топлива;
- введение новых правил;
- состояние рынка судовых двигателей;
- конструкция корпуса в зависимости от осадки и диаметра гребного винта, а также расположение двигателя и обводов корпуса в кормовой части судна;
- эксплуатационный профиль судов и сочетание стоимости топлива и фрахтовых ставок.

Разработки направлены на достижение трех основных целей: повышение эффективности, снижение выбросов и повышение надежности.

Повышение эффективности. Конкуренция и требования к энергоэффективности судовых энергетических установок выдвигают на первый план меры по повышению экономичности двигателей. Практические ограничения эффективности связаны с необратимыми потерями, такими как потери тепла в стенки цилиндра, необратимые потери в процессе сгорания, трение в деталях группы движения. В этом плане более выигрышно позиционируются двигатели с большим размером цилиндра. Большие двигатели априори эффективнее двигателей меньшего размера исключительно благодаря большим размерам и низкой частоте вращения коленчатого вала. Большой размер цилиндра означает, что меньшее отношение поверхности теплоотвода к объему в камере сгорания приведет к меньшим потерям теплопередачи. Уменьшенная частота вращения означает меньшие потери на трение. В то же время размер и стоимость больших двигателей делают

экономически выгодной установку систем рекуперации энергии, которые могут повысить общую энергоэффективность.

В числе первых способов повышения эффективности следует рассматривать увеличение работы, совершаемой в цикле, или, альтернативно, увеличение энергии, доступной в отработавших газах для использования в устройствах рекуперации энергии. Выходная мощность может увеличиваться за счет изменения объема, изменения давления и изменения показателя политропы (сжатия и расширения). Изменения полезно используемого объема цилиндра и давления в цилиндре могут быть вызваны изменением степени сжатия, изменением цикла посредством изменения хода поршня или изменения фаз газораспределения, изменением плотности заряда посредством более высокого давления наддува и / или быстрого роста давления за счет быстрого сгорания с высокой скоростью тепловыделения.

Стремление к увеличению максимального и среднего давления в цилиндре для достижения более высокой удельной мощности сдерживается проблемами с материалами, трибологией, износом и в конечном счете надежностью. Технологический прогресс приводит к улучшению материалов и методов проектирования, что позволяет производить двигатели с повышенной тепловой и механической нагрузкой. Повышение эффективности турбокомпрессоров и производство компонентов системы впрыска топлива высокого давления способствуют увеличению среднего давления в цилиндре. Эти разработки позволяют усовершенствовать конструкцию камеры сгорания, что обеспечивает возможность достижения более высоких максимальных давлений при снижении тепловой нагрузки и улучшенном смесеобразовании топливовоздушных смесей. Дополнительная оптимизация процессов смесеобразования достигается за счет возможностей электронного управления топливоподачей. Управление давлением и характером подачи топлива, использование многократных впрысков позволяет контролировать процесс топливоподачи и оптимизировать тепловыделение. Наиболее убедительно эти эффекты проявляются на переходных режимах и режимах малой мощности, когда совместное управление топливоподачей и фазами газораспределения способствует ощутимому росту эффективности работы двигателя. Необходимо учитывать, что процессы смесеобразования и сгорания в дизельном цикле далеки от равновесных — часть энергии затрачивается на нагрев реагентов и поглощение энергии активации реакций, и здесь может быть скрыт потенциал для дальнейших исследований.

Несмотря на то, что качество организации внутрицилиндровых процессов двигателя внутреннего сгорания приближается к границам термодинамического совершенства, некоторый потенциал в повышении эффективности может быть выявлен в снижении внутренних потерь в цилиндре. В этом плане интересной целью для повышения эффективности двигателя может показаться снижение потерь тепла в стенки камеры сгорания. Однако многочисленные исследования, проведенные ранее в рамках разработки концепции создания «адиабатного двигателя» или двигателя с ограниченным теплоотводом, достаточно убедительно показали [5, 6], что изготовление стенок из низкотеплопроводных материалов с малой плотностью (конструкционных керамических материалов) вызывает перераспределение статей теплового баланса в сторону повышения энергии, отводимой с отработавшими газами, а термодинамическая эффективность двигателя при этом, в лучшем случае, не ухудшается. Это обуславливается необратимыми негативными изменениями в процессе сгорания, а также снижением коэффициента наполнения цилиндра с высокотемпературными стенками. Кроме того, возникает ряд проблем трибологического плана. Тем не менее более высокая энергия отработавших газов может быть успешно использована в различных агрегатах утилизации, таких как силовая турбина, утилизационный котел паротурбинной установки, турбоэлектрокомпрессор, турбогидравлическая система, органический цикл Ренкина и т. д., как подтверждено в многочисленных исследованиях [7–10]. Необходимо отметить, что потенциал рекуперации тепла отработавших газов неизменно связан с увеличением инвестиционной стоимости и дополнительными затратами в эксплуатации энергетической установки, которые подлежат достаточно быстрой окупаемости.

Рассматривая проблему сокращения внутренних потерь, не следует упускать из вида вопросы трибологии. Потери на трение в группе движения двигателя, особенно в поршневых кольцах, неуклонно увеличивающиеся с ростом частоты вращения коленчатого вала, скорости движения поршня и ростом нагрузки (среднего эффективного давления), составляют значительную часть механических потерь, снижая механический КПД двигателя. Снижение трения за счет использования новых материалов и технологий, в том числе нанесения покрытий и напыления материалов, обладающих низким коэффициентом трения, усовершенствования систем смазки, применения более эффективных смазывающих материалов, способно напрямую повысить эффективность двигателя².

Потери процессов газообмена можно снижать за счет более точного профилирования каналов, а также устранения шероховатостей поверхностей проточных частей даже за счет облицовки, которая одновременно способствует также снижению сопротивления движению газа и сохраняет энергию отработавших газов путем сокращения потерь тепла в стенки каналов. Следует признать, что такие потенциальные резервы повышения эффективности весьма незначительны. Также некоторые резервы могут быть найдены в совершенствовании энергопотребления, зависящего от двигателя навесного оборудования (например, задействование интеллектуального компьютерного управления системой охлаждения и смазки, оптимизация насосов систем топливоподачи).

Определенные перспективы можно изыскать в повышении эффективности работы системы свободного газотурбинного наддува. Увеличение давления наддува с необходимыми корректировками впрыска топлива способно привести к существенному увеличению удельной мощности и некоторому повышению эффективности. Однако возрастание давления в цилиндре создает дополнительные сложности, связанные с механической нагрузкой на коленчатый вал и подшипники, а также с проблемами смазки. Одноступенчатый турбонаддув имеет практический предел степени повышения давления 5: 1, если требуется разумная ширина рабочего диапазона выше которого рабочие колеса центробежных компрессоров из алюминиевых сплавов испытывают проблемы проскальзывания из-за высоких частот вращения рабочих колес и высокой температуры сжатого воздуха, что требует охлаждения рабочих колес или использования титановых рабочих колес. КПД турбокомпрессора довольно высок и его улучшение затруднено, но, возможно, имеется еще некоторый запас для улучшения характеристик при частичной нагрузке. Повышение КПД турбокомпрессора позволяет использовать избыточную мощность турбины при высоких нагрузках двигателя, которую можно использовать для привода генератора от вала турбокомпрессора.

Двухступенчатый турбонаддув представляет собой относительно простое решение для увеличения удельной мощности, но с более высокими затратами, сложной системой трубопроводов и снижением эффективности при низких нагрузках, когда рабочие колеса работают с низким КПД. Для обеспечения работы на частичных режимах рациональным решением может оказаться отключение турбокомпрессора в случае использования в системе несколько агрегатов наддува (рис. 2). В этом направлении далеко не исчерпанным потенциалом представляется управление проточными частями лопаточных машин. Программное управление направляющим аппаратом агрегата наддува обеспечивает поддержание высокого уровня эффективности работы агрегата во всем рабочем диапазоне и, следовательно, повышение экономичности двигателя, особенно для двухтактного цикла, когда на режимах малых мощностей возникает необходимость подключения автономных воздухоподогревателей для гарантирования протекания процесса газообмена.

² CIMAC Recommendation 31. The lubrication of two-stroke crosshead diesel engines // 2017–05 (1st edition) // CIMAC Central Secretariat c/o VDMA. [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://www.cimac.com/cms/upload/workinggroups/WG8/Documents/Recommendations/Recommendation_31_2018-03-25_CIMAC_WG8-SG4_2-Stroke_Lubrication_FINAL.pdf.

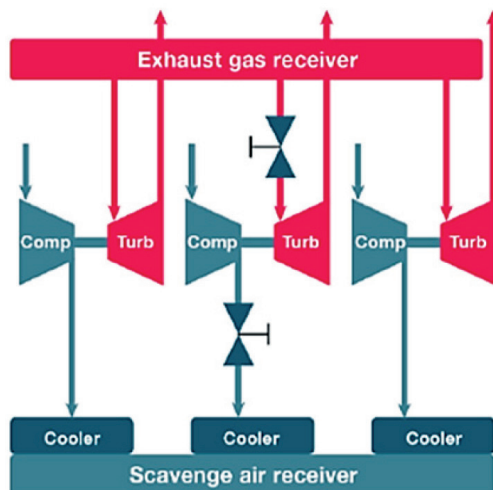


Рис. 2. Схема отключения турбонаддува, когда один из трех турбокомпрессоров может быть выключен из работы на режимах малых мощностей [9]

Снижение выбросов вредных веществ с отработавшими газами. Борьба с вредными выбросами в составе отработавших газов является важной проблемой в разработках, в ряде случаев даже отодвигая на второй план вопросы достижения высокой топливной экономичности [11–15].

Основным вредным компонентом в составе отработавших газов дизельного двигателя являются оксиды азота NO_x — обобщенное название монооксида азота NO (основного компонента, составляющего до 95 %) и диоксида азота NO_2 . Образование оксидов азота в первую очередь зависит от температуры газа в цилиндре и времени поддержания высоких температур в цикле. Очевидно, что малооборотные двухтактные двигатели оказываются в самом сложном положении ввиду высоких температур в цикле и длительности их воздействия на рабочее тело в цилиндре. По этой причине, в соответствии с действующими ограничениями эмиссии, к ним предъявляются лояльные требования по сравнению со среднеоборотными и высокооборотными дизелями. Понижение температур в локальных зонах горения дает хорошие результаты по сокращению выбросов, однако все методы, ориентированные на это, находятся в противоречии с топливной экономичностью, снижая термический КПД цикла в соответствии с теоремой Карно. К таким методам относятся управление процессом топливоподачи для сдерживания скоростей тепловыделения и переносом части тепловыделения на линию расширения, управление составом рабочего тела — насыщение заряда цилиндра веществом, обладающим высокой теплоемкостью (непосредственный впрыск воды в цилиндр, увлажнение всасываемого воздуха, использование водотопливных эмульсий). Определенный потенциал сосредоточен в технологиях сокращения кислорода в подаваемом воздухе для замедления сгорания. Следует признать, что указанные методы не обеспечивают существенного снижения уровня эмиссии NO_x , поэтому могут использоваться только для обеспечения требования глобальных ограничений эмиссии и оказываются неэффективными для достижения требований, распространяемых на выделенные зоны контроля (NECA). Для соблюдения строгих требований в зонах контроля перспективным является использование систем рециркуляции отработавших газов — EGR.

Системы EGR имеют довольно длительную историю использования в двигателях автомобильного назначения, однако эта технология пока не получила широкого распространения в крупных судовых двигателях. Технология рециркуляции отработавших газов сочетает сразу два эффекта. Во-первых, отработавшие газы, содержащие диоксид углерода и пары воды, обладают значительной теплоемкостью, благодаря чему происходит сдерживание температур газа в цилиндре за счет отбора внутренней энергии внутрицилиндрового газа на их разогрев. Во-вторых, пониженное содержание кислорода в рабочем теле замедляет процессы горения, тем самым пре-

пятствуя росту пиковых значений температур газа в цикле, частично перенося сгорание на линию расширения. При степени рециркуляции отработавших газов порядка 30–35 % обеспечивается сокращение выбросов NO_x до 80 %, что соответствует требованиям стандарта Международной морской организации третьего уровня (Tier III), соблюдение которого является обязательным для судов, работающих в зонах NECA.

Работа малооборотных двигателей на тяжелых остаточных топливах вносит определенную специфику в организацию и работу систем рециркуляции. Во избежание потерь в коэффициенте наполнения, что является очень критичным для двухтактного двигателя, рециркулирующий газ должен охлаждаться перед подачей в точку смешения с подаваемым воздухом. Кроме того, работа на тяжелых остаточных видах топлива сопряжена с повышенными выбросами твердых частиц и в ряде случаев с неуспешными догореть углеводородами, попадание которых во впускной тракт двигателя вызовет облитерацию проточных частей и может нанести значительный ущерб. Исходя из этого рециркулирующий газ требует предварительной очистки перед подачей в двигатель. Сбор, хранение и переработка получаемого шлама является одной из проблем и препятствием для широкого распространения систем в конструкции судовых двигателей. Также важно понимать, что внедрение системы рециркуляции связано со значимыми изменениями в протекании рабочего процесса двигателя. Как следствие, от производителя требуется дополнительная тщательная настройка всех внутрицилиндровых процессов во избежание выхода за пределы дымления и выбросов несгоревших углеводородов, вызванных более продолжительным сгоранием. Очевидно, что такую адаптацию рабочего процесса может произвести только разработчик и это неизбежно повлечет дополнительные затраты.

Принципиально, что в судовых двигателях рассматриваются два способа организации системы EGR, а именно системы высокого и низкого давления. В системах низкого давления отбор газа на рециркуляцию производится за турбиной турбокомпрессора под низким давлением и после очистки в скрубберной системе при помощи нагнетателя подается на вход компрессора. Такая система имеет внушительные габариты и оперирует большими объемами газа, благодаря чему позволяет производить точное дозирование подачи рециркулирующего газа. Однако ввиду больших объемов рециркулирующего газа система проявляет медленный отклик на изменения режимов работы двигателя. Система рециркуляции отработавших газов высокого давления, в которой газ отбирается перед турбиной и подается нагнетателем за компрессором, обладает весьма скромными габаритами, отличается быстрым откликом на изменения режимов, но при этом, ввиду использования малых объемов газа, находящегося под давлением, создает некоторые проблемы в плане точного дозирования подачи газа на рециркуляцию.

Следует ожидать, что учитывая низкие эксплуатационные расходы и нечувствительность к видам используемого топлива, системы рециркуляции будут получать все более широкое распространение в конструкциях судовых двигателей, как это произошло в двигателях автотранспортного назначения. Также определенный интерес представляют решения по использованию так называемой *внутренней рециркуляции*, которая, по сути, сводится к намеренному ухудшению очистки цилиндра, т. е. повышению коэффициента остаточных газов.

Рассмотрение проблем сокращения эмиссии NO_x было бы неполным без упоминания технологии селективного каталитического восстановления — SCR. Необходимо уточнить, что эта технология не имеет прямого отношения к рассматриваемой теме публикации, поскольку не оказывает практически никакого влияния на процессы в двигателе и, в принципе, являясь периферийной системой, не связана с серьезными изменениями в конструкции или настройках двигателя. Но SCR в настоящее время является наиболее распространенной и апробированной технологией борьбы с выбросами оксидов азота в судовых дизельных энергетических установках. Несмотря на высокую инвестиционную стоимость, которая может составлять 20–30 % от стоимости двигателя, высокие эксплуатационные расходы, включающие до 8 % и более от стоимости используемого топлива, значительные затраты на сменные модули реактора, а также высокую требовательность к используемому топливу (работа на тяжелых высокосернистых топливах требует соблюдения

особых условий) и к поддержанию температурного режима протекания каталитических реакций, установками SCR оборудуется большое количество судов, в особенности тех, работа которых предполагается в зонах контроля NECA.

Важным аспектом проблемы обеспечения экологической безопасности является ограничение выбросов оксидов серы — SO_x . Действующие нормативные требования накладывают ограничения на содержание серы в топливе в пределах 0,10 % в зонах контроля SECA и 0,50 % во всех остальных районах плавания. Простым способом достижения соответствия действующим требованиям является переход на низкосернистые виды топлива ULSFO и VLSFO с содержанием серы 0,10 % и 0,50 % соответственно, легкие виды дисциллярных топлив — MGO и др. Однако такой «простой» переход не может не иметь последствий для двигателя. Тщательно разработанная и доведенная в течение десятков лет конструкция и подобранные смазочные материалы предусматривают работу двухтактных малооборотных крейцкопфных двигателей на тяжелых остаточных высокосернистых топливах, поэтому переход на соответствующее требованиям топливо сопряжен с некоторыми корректировками в выборе смазывающих материалов и, возможно, с новыми подходами к материалам и отдельным элементам конструкции двигателя. Использование скрубберных систем очистки отработавших газов от оксидов серы, рассматриваемое как альтернативный способ соответствия требованиям, представляется малопродуктивным, поскольку не обеспечивает в должной мере достижение конечной цели: снижения закисления мирового бассейна в районах интенсивного судоходства, за исключением использования технологии скрубберов замкнутого контура, которыми оборудованы всего порядка 4 % работающих судов.

Вопросам сокращения выбросов твердых частиц уделяется должное внимание в основном только на этапах проектирования и доводки двигателей, а основной упор делается на ограничения дымности отработавших газов. В эксплуатации выбросы твердых частиц образуются не только в результате неполного выгорания сажи, неизбежно образующейся на отдельных этапах процесса сгорания в дизельном цикле, но и в результате зольности используемых остаточных топлив, а также попадающего в отработавшие газы незначительного количества продуктов износа. Можно ожидать с достаточной долей вероятности, что дальнейшие ужесточение нормативных требований по экологической безопасности судовых двигателей приведет к необходимости использования сажевых фильтров, как это произошло с двигателями автотранспортного назначения.

Экологическая безопасность судовых двигателей касается не только сокращения рассмотренных ранее в работе вредных выбросов, но и выбросов так называемых *чистых продуктов* сгорания — паров воды и углекислого газа, ответственных за создание парникового эффекта в атмосфере. Использование ископаемых топлив приводит к расконсервированию накопленных углеводородов в недрах Земли и насыщению нижних слоев атмосферы парниковыми газами, в основном диоксидом углерода. Малооборотные крейцкопфные двигатели, устанавливаемые на крупнотоннажных судах торгового флота, производят до 50 % от суммарных выбросов CO_2 всего судоходства, поэтому вопросы декарбонизации приобретают все большую актуальность.

Сокращение выбросов парниковых газов приводит к всемерному росту энергосбережения в отрасли, включая логистические проблемы, сокращение сопротивления движению судна и повышение энергоэффективности энергетических установок. Значительный резерв предполагается в переходе на альтернативные виды топлива³. Наибольшие ожидания связаны с использованием природного газа, который состоит в основном из метана [16]. Отсутствие углерод-углеродных связей в молекуле метана обеспечивает до 28 % сокращения выбросов CO_2 при сгорании. Кроме того, метан может быть получен как быстро возобновляемый углеродно-нейтральный источник энергии (биогаз), не нарушая кругооборота углерода в природе. По прогнозам энергопотребления судходной отраслью ожидается, что использование природного газа будет неуклонно расти в обозримом будущем, а, следовательно, производство двигателей, способных использовать в качестве

³ CIMAC Guideline/ Alternative fuels emission control for large combustion engines. [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://www.cimac.com/cms/upload/Publication_Press/WG_Publications/CIMAC_WG5_guideline_alternative_fuels.pdf.

основного газомоторное топливо, будет проявлять тенденции к увеличению объемов выпуска. В настоящее время разработчики уделяют значительное внимание конструкциям двухтопливных двигателей, работающих по газодизельному циклу, не оставляя без внимания концепцию создания газовых двигателей. Разработки ведутся как в области создания двигателей с газом низкого (подача газа, находящегося под низким давлением (до 16 бар) в процессе наполнения или на начальном этапе процесса сжатия) и высокого давления, когда топливный газ под давлением 300 бар и более подается в конце сжатия одновременно с запальным топливом, что позволяет минимизировать эффект «проскальзывания метана» и попадание его на выпуск. Множество проблем, возникающих на пути создания двигателей, способных работать на газомоторном топливе, могут являться предметом отдельного рассмотрения и выходят за рамки настоящей работы.

Аналогичные результаты по сокращению выбросов диоксида углерода, достигаемые при использовании природного газа, могут быть получены при использовании метанола в качестве топлива⁴. Учитывая положительные результаты разработок метанольных двигателей WinGD и созданную инфраструктуру с выделенными зонами бункеровки, можно предположить, что полученный импульс будет поддержан и метанольные двигатели получат более широкое распространение в двухтактных конструкциях. Это также подтверждается работами MAN Energy Solutions (MAN ES), предлагающей множество решений модификации для оптимизации энергоэффективности и работы на различных видах топлива для двухтактных судовых двигателей MAN B&W, способствующих обезуглероживанию трансокеанских перевозок (рис. 3).

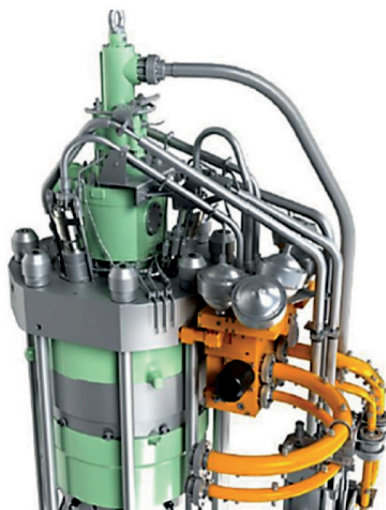


Рис. 3. Комплект модернизации MAN ES [9]

Интересным направлением работ в этой области представляется использование безуглеродных топлив, в частности, аммиака. Аммиак как топливо имеет ряд недостатков в плане энергоемкости, хранения и, что самое главное, весьма специфических свойств горения в камере сгорания двигателя. Тем не менее инфраструктура производства, хранения и транспортировки NH_3 оказывается достаточно развитой по причине его широкого применения в иных областях. Это в значительной степени предопределяет его потенциальные возможности и перспективы использования в качестве моторного топлива (рис. 4). Работы по использованию аммиака имеют многолетнюю историю и в настоящее время находятся в стадии апробации в эксплуатации. Так, японской компанией Japan Engine Corporation (J-ENG) подготовлен серийный выпуск первого в мире коммерческого двухтопливного судового двигателя на аммиаке — модели 7UEC50LSJA-HPSCR. Судоходная компания EXMAR сообщила о спуске на воду инновационного газовева среднего размера

⁴ CIMAC Guideline. Frequently Asked Questions (FAQ) ISO 6583:2024: Methanol as a fuel for marine applications — General requirements and specifications. [Электронный ресурс]. — Режим доступа: https://www.cimac.com/cms/upload/workinggroups/WG7/CIMAC_Guideline_FAQ_ISO_6583_Methanol_01_2025.pdf.

с двухтактным двигателем WinGD типа X-DF-A, специально разработанного для работы на аммиаке, а компания MAN ES представляет свои разработки комплексных пакетов модернизации действующих двигателей MAN B&W типа ME-C для перехода на NH_3 (двигатели линейки LGIA с диаметром цилиндра 500–950 мм).

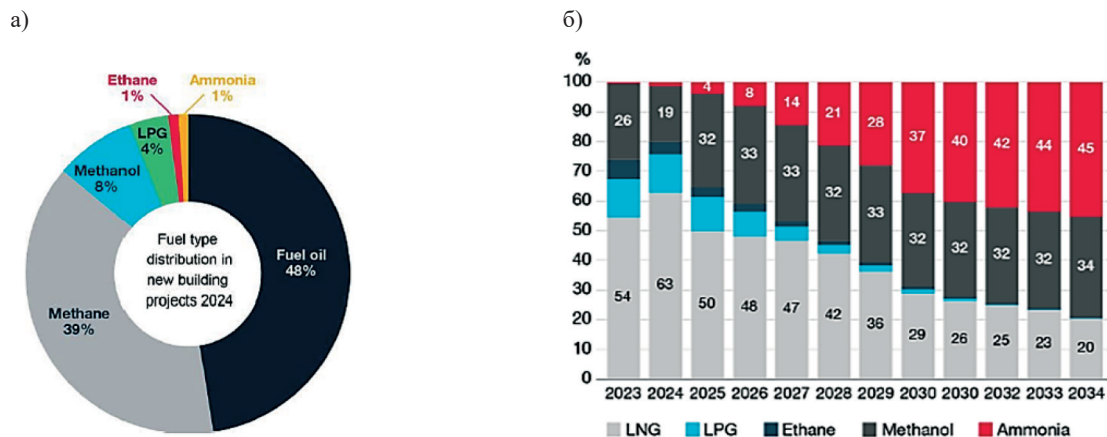


Рис. 4. Распределение проектов 2024 г. по типам топлива (а) и прогноз использования альтернативных топлив в заказах двухтопливных установок (б) [9]

Повышение надежности. Глубина проработки конструкции, постоянное совершенствование технологий изготовления, тщательный подбор материалов и накопленный опыт отказов и их устранения в эксплуатации делает двухтактные крейцкопфные двигатели чрезвычайно надежными агрегатами в составе судовой энергетической установки. Основные отказы в эксплуатации относятся к тяжело нагруженным термическим напряжениям и компонентам (более 50 % отказов), из которых наибольший процент приходится на плохое состояние цилиндров [1]. Значительную долю поломок также составляют агрегаты наддува. Повышение надежности и безотказности работы установок находится в плоскости точной оценки текущего состояния отдельных деталей и двигателя в целом. Современные системы мониторинга оказываются наиболее действенным приборным способом предотвращения аварийных случаев и способны идентифицировать нарушения в работе на ранних стадиях, предупреждая усугубление и развитие аварийных ситуаций. Дальнейшее развитие таких систем, несомненно, позволит достичь более высокого уровня надежности.

Одним из основных вопросов любой системы мониторинга является то, что каждый датчик является интерфейсом с реальным процессом, и проверка правильности работы датчика может быть выполнена только с помощью других параллельных датчиков или посредством математического вывода ожидаемых значений. Периодически данные собираются в отчете об обслуживании и передаются в штаб-квартиру для дальнейшей обработки и оценки. Благодаря современным технологиям сбора данных и связи такие «отчеты» могут передаваться практически в режиме реального времени, что приводит к потоку данных, требующих обработки и оценки как на борту, так и в главном офисе. В принципе, оценка производительности двигателя и диагностика неисправностей могут быть достигнуты путем сравнения фактических контролируемых данных с неким «эталоном» ожидаемых характеристик. Контролируемые данные должны быть надежными (с учетом неисправностей датчика или системы мониторинга, а также человеческих ошибок при регистрации и отчетности), а справочные данные должны соответствовать реальным условиям эксплуатации и окружающей среды.

На основе данных систем мониторинга судоходные компании с учетом требований и рекомендаций изготовителя должны разработать соответствующую политику эксплуатации и технического обслуживания. Для адекватных оценок, на основе которых формируется указанная политика и, в конечном итоге, обеспечение дальнейшего роста надежности, требуется повышение уровня сложности систем оценки текущего состояния и производительности двигателя.

Заключение (Conclusion)

В настоящее время малооборотный двухтактный крейцкопфный двигатель обладает среди прочих тепловых двигателей самым высоким КПД, который превышает 50–52 % и в перспективе может приблизиться к 55 % при удельном эффективном расходе топлива до 165 г/кВт · ч. Малая частота вращения коленчатого вала позволяет использовать прямую передачу мощности на движитель, тем самым обеспечивая минимизацию потерь в передаче и позволяя добиться высокой производительности винта. Поддерживая работу на самых дешевых сортах топлива с достижением высоких ресурсных показателей до 180 000 ч, двигатель является привлекательным для операторов торгового флота, что предопределяет благоприятные прогнозы перспектив его дальнейшего использования. Дальнейшее совершенствование малооборотных двухтактных двигателей является многоплановым, так как содержит три главных направления: рост энергоэффективности, повышение уровня экологической безопасности и неуклонный рост надежности конструкции в эксплуатации.

Несмотря на достижение практического термодинамического максимума эффективности цикла двухтактного малооборотного двигателя, в процессе его дальнейшего совершенствования остаются некоторые резервы, разработка которых может привести к росту топливной экономичности. Это относится к снижению внутренних тепловых потерь, снижению трения в механизмах и, что самое главное, — к глубокой утилизации энергии отработавших газов.

Постоянно ужесточающиеся требования экологической безопасности судовых энергетических установок вынуждают производителей предпринимать меры по сокращению вредных выбросов с отработавшими газами. При этом мероприятия, направленные на достижение действующих и перспективных требований, в большинстве случаев находятся в противоречии с проблемами топливной экономичности. Это, в первую очередь, относится к методам борьбы с эмиссией оксидов азота как за счет непосредственного управления тепловыделением в цилиндре, так и использования систем рециркуляции отработавших газов, совершенствование которых будет продолжаться в обозримом будущем с учетом того, что при степени рециркуляции 30–35 % система способна обеспечивать сокращение удельных выбросов NO_x до 80 % или до 3,4 г/(кВт·ч), позволяющее работать в зонах контроля NECA.

Значительное влияние на развитие малооборотных двухтактных двигателей оказывают мероприятия по сокращению выбросов парниковых газов. Наиболее перспективным направлением представляется переход к использованию природного газа. Согласно существующим прогнозам, составляющая природного газа в общей структуре энергопотребления судоходной отрасли (~11 экса джоулей (ЭДж) в год) будет увеличиваться приблизительно с 1,3 ЭДж в 2025 г. до 2,3 ЭДж/год к 2030 г., а в 2050 г. достигнет 3,8 ЭДж, т. е. практически в 3 раза превысит современный уровень. В более отдаленной перспективе ожидается рост использования безуглеродных топлив, в частности, аммиака, уровень потребления которого к 2050 г. планируется довести до 2 ЭДж/год.

Перспективы повышения надежности эксплуатации дизельных энергетических установок неразрывно связаны с дальнейшим совершенствованием систем мониторинга, которое будет охватывать элементную базу, корректность представления данных и повышение требований к системе планирования обслуживания, а также своевременное устранение возникающих неисправностей.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Шурпак В. К.* Анализ современных тенденций применения двигателей внутреннего сгорания на морских судах / В. К. Шурпак // Научно-технический сборник Российского морского регистра судоходства. — 2024. — № 75. — С. 47–60. — EDN GDAGAH.
2. *Dragsted J.* The first 50 years of turbocharged 2-stroke, crosshead, marine diesel engines / Dragsted J. — Frankfurt: CIMAC, 2013. — 98 p.
3. *Kyrtatos N. P.* Slow-Speed Two-Stroke Engines / N. P. Kyrtatos // Encyclopedia of Maritime and Offshore Engineering 2017. — С. 1–10. DOI: 10.1002/9781118476406.emoe098.

4. Серов А. В. Морские двухтопливные ДВС: нормативные требования и особенности конструкции / А. В. Серов, Д. С. Семионичев // Материалы Всероссийского научно-технического форума «Корабельная энергетика: из прошлого в будущее», 13–17 февраля 2017 г. — СПб.: Изд-во СПбГМТУ, 2017.
5. Огородников В. Б. Влияние степени и способа тепловой изоляции камеры сгорания на параметры и тепловой баланс дизеля / В. Б. Огородников, В. В. Бордуков, Г. Е. Живлюк // ЦНИИТЭИ ТЯЖМАШ Экспресс информация. Отечественный опыт. — 1987. — Т. 4. — № 6.
6. Огородников В. Б. Анализ тепловыделения в камере сгорания двигателя с ограниченным теплоотводом / В. Б. Огородников, В. В. Бордуков, Г. Е. Живлюк // ЦНИИТЭИ ТЯЖМАШ Экспресс информация. Отечественный опыт. — 1987. — Т. 4. — № 9.
7. Живлюк Г. Е. Анализ возможности создания высокоэкономичного турбокомпаундного двигателя 6ЧН 12/14 / Г. Е. Живлюк // Двигателестроение. — 1989. — № 10. — С. 49–53.
8. Развитие газовых двигателей (по материалам конгресса CIMAC) // Двигателестроение. — 2021. — № 4(286). — С. 31–53. — EDN MFYJEP.
9. Jacobsen D. M. S. New retrofit solutions for MAN B&W marine two-stroke engines / D. M. S. Jacobsen, A. Sh. Dashpute, A. A. Parikh // CIMAC congress 25, Zurich, may 19–23 — Zurich: CIMAC, 2025. — С. 2025/181.
10. Kawakita C. Next-generation ship development in Japan / C. Kawakita, K. Takasaki // CIMAC congress 25, Zurich, may 19–23 — Zurich: CIMAC, 2025. — Pp. 2025/1.
11. Петров А. П. Технологии достижения новых требований по выбросам оксидов азота судовыми энергетическими установками / А. П. Петров, Г. Е. Живлюк // Труды Крыловского государственного научного центра. — 2021. — № 1. — С. 83–85. DOI: 10.24937/2542-2324-2021-1-S-I-83-85. — EDN MXGGBP.
12. Живлюк Г. Е. Эффективность ограничения выбросов оксидов азота системами рециркуляции отработавших газов судовых ДВС / Г. Е. Живлюк, А. П. Петров // Вестник государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2023. — Т. 15. — № 5. — С. 845–857. DOI: 10.21821/2309-5180-2023-15-5-845-857. — EDN XPIVLD.
13. Реуцкий А. С. Оценка влияния типа используемого судового топлива на величину углеродного следа транспортной услуги / А. С. Реуцкий, В. В. Якимов, А. А. Буцанец // Научно-технический сборник Российского морского регистра судоходства. — 2024. — № 76. — С. 87–95. — EDN ICJSQD.
14. Живлюк Г. Е. Экологическая безопасность энергетических установок: двухтопливные и газовые двигатели / Г. Е. Живлюк, А. П. Петров // Вестник государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2022. — Т. 14. — № 3. — С. 449–462. DOI: 10.21821/2309-5180-2022-14-3-449-462. — EDN IWDJGT.
15. Буянов А. С. Анализ опыта применения метанола и этанола в качестве топлива на судах / А. С. Буянов, О. Н. Леонова, А. С. Реуцкий // Научно-технический сборник Российского морского регистра судоходства. — 2021. — № 64–65. — С. 91–97. — EDN MIMXNW.
16. Stein J. O. Premixed combustion of alternative fuels as a fast and economic path to decarbonize / J. O. Stein // CIMAC congress 25, Zurich, may 19–23 — Zurich: CIMAC, 2025. — Pp. 2025/015.

REFERENCES

1. Shurpyak, V. K. “Analysis of current trends in the use of internal combustion engines on ships.” Research Bulletin By Russian Maritime Register of Shipping 75 (2024): 47–60.
2. Dragsted, J. *The first 50 years of turbocharged 2-stroke, crosshead, marine diesel engines*. Frankfurt: CIMAC, 2013: 98.
3. Kyrtatos, N. P. “Slow-Speed Two-Stroke Engines.” *Encyclopedia of Maritime and Offshore Engineering*. 2017: 1–10. DOI: 10.1002/9781118476406.emoe098.
4. Serov, A. V. and D. S. Semionichev. “Morskie dvukhtoplivnye DVS: normativnye trebovaniya i osobennosti konstruksii.” *Materialy Vserossiyskogo nauchno-tekhnicheskogo foruma «Korabel'naya energetika: iz proshlogo v budushee»*, 13–17 fevralya 2017 g. SPb.: Izd-vo SPbGMTU, 2017.
5. Ogorodnikov, V. B., V. V. Bordukov and G. E. Zhivlyuk. “Vliyanie stepeni i sposoba teplovoy izolyatsii kamery sgoraniya na parametry i teplovoy balans dizelya.” *TsNIITEI TYaZhMASH Ekspress informatsiya. Otechestvennyy opyt* 4.6 (1987).
6. Ogorodnikov, V. B., V. V. Bordukov and G. E. Zhivlyuk. “Analiz teplovydeleniya v kamere sgoraniya dvigatelya s ogranichenym teplootvodom.” *TsNIITEI TYaZhMASH Ekspress informatsiya. Otechestvennyy opyt* 4.9 (1987).

7. Zhivlyuk, G. E. “Analiz vozmozhnosti sozdaniya vysokoeconomichnogo turbokompaundnogo dvigatelya 6ChN 12/14.” *Dvigatelsestroenie* 10 (1989): 49–53.
8. “Razvitie gazovykh dvigateley (po materialam kongressa CIMAC).” *Engines Construction* 4(286) (2021): 31–53.
9. Jacobsen, D.M.S., A. S. Dashpute., A. A. Parikh “New retrofit solutions for MAN B&W marine two-stroke engines” *CIMAC congress 25, Zurich, may 19–23: (2025)*. P 2025/181.
10. Kawakita, C. and K. Takasaki. “Next-generation ship development in Japan.” *CIMAC congress 25, Zurich, may 19–23 Zurich: CIMAC, 2025: 2025/1*.
11. Petrov, A. P. and G. E. Zhivlyuk. “Technologies for achieving new requirements for emissions of nitrogen oxides by marine power plants.” *Transactions of The Krylov State Research Centre* 1 (2021): 83–85. DOI: 10.24937/2542-2324-2021-1-S-I-83-85.
12. Zhivlyuk, G. E. and A. P. Petrov. “Efficiency of limiting nitrogen oxides emissions by exhaust gas recirculation systems of marine internal combustion engines.” *Vestnik gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 15.5 (2023): 845–857. DOI: 10.21821/2309-5180-2023-15-5-845-857.
13. Reutskiy, A. S., V. V. Yakimov and A. A. Butsanets. “Assessment of the impact of the type of marine fuel used on the carbon footprint of the transport service.” *Research Bulletin By Russian Maritime Register of Shipping* 76 (2024): 87–95.
14. Zhivlyuk, G. E. and A. P. Petrov. “Environmental safety of power plants: dual-fuel and gas engines.” *Vestnik gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 14.3 (2022): 449–462. DOI: 10.21821/2309-5180-2022-14-3-449-462.
15. Buyanov, A. S., O. N. Leonova and A. S. Reutskiy. “Analiz opyta primeneniya metanola i etanola v kachestve topliva na sudakh.” *Research Bulletin By Russian Maritime Register of Shipping* 64–65 (2021): 91–97.
16. Stein, J. O. “Premixed combustion of alternative fuels as a fast and economic path to decarbonize.” *CIMAC congress 25, Zurich, may 19–23 Zurich: CIMAC, 2025: 2025/015*.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Живлюк Григорий Евгеньевич —
кандидат технических наук, доцент
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала
С. О. Макарова»
198035, Российская Федерация, Санкт-Петербург,
ул. Двинская, 5/7
e-mail: spb-engine-prof@mail.ru, kaf_dvs@gumrf.ru
Петров Александр Павлович —
кандидат технических наук, доцент
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала
С. О. Макарова»
198035, Российская Федерация, Санкт-Петербург,
ул. Двинская, 5/7
e-mail: app.polab@inbox.ru, PetrovAP@gumrf.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Zhivljuk, Grigorij E. —
PhD in Technical Sciences, associate professor
Admiral Makarov State University of Maritime
and Inland Shipping
5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg, 198035,
Russian Federation
e-mail: spb-engine-prof@mail.ru, kaf_dvs@gumrf.ru
Petrov, Aleksandr P. —
PhD in Technical Sciences, associate professor
Admiral Makarov State University of Maritime
and Inland Shipping
5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg, 198035,
Russian Federation
e-mail: app.polab@inbox.ru, PetrovAP@gumrf.ru

Статья поступила в редакцию 18 декабря 2025 г.

Received: Dec. 18, 2025

СУДОВЫЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ УСТАНОВКИ И ИХ ЭЛЕМЕНТЫ (ГЛАВНЫЕ И ВСПОМОГАТЕЛЬНЫЕ)

DOI: 10.21821/2309-5180-2026-18-1-128-138

EDN YHOSKX

METHOD FOR COMPREHENSIVE ASSESSMENT OF THE TECHNICAL CONDITION OF MARINE DIESEL ENGINES USING MULTIDIMENSIONAL ANALYSIS

O. V. Afanaseva

St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation,
St. Petersburg, Russian Federation

The research focuses on developing a comprehensive method for assessing the technical condition of marine diesel engines using multidimensional analysis. In the context of tightening environmental standards and increasing reliability requirements for diesel engines, the development of comprehensive approaches that provide an integral assessment of their technical condition during the transition to predictive maintenance systems is relevant. The main problem addressed in this work is the absence of a comprehensive approach that enables the integration of disparate data from heterogeneous diagnostic systems into a single objective assessment of the technical condition of marine diesel engines. The object of the research is the processes of diagnosing marine diesel engines, and the subject is the existing methods for comprehensive assessment of their technical condition. The aim of the study is to develop a method that ensures an integral assessment and operational visualization of the technical condition of a marine diesel engine, provides a quantitative evaluation of its degree of degradation, enables objective comparison of different marine diesel engines, and formalizes decisions regarding the need for repair. To achieve this aim, the task of coordinating heterogeneous diagnostic features (parametric, vibroacoustic, oil analysis data, etc.) characterized by different units of measurement and time scales is addressed. The proposed approach is based on multidimensional analysis. The assessment procedure includes classification of diagnostic parameters, their linear normalization to a unified dimensionless scale, and transformation of the multidimensional diagnostic space into a two-dimensional visual model — a radar chart. For quantitative evaluation, the area of the chart is calculated and modified by introducing weighting coefficients that reflect the significance of each parameter; additionally, coefficients characterizing wear asymmetry and uniformity of unit degradation are introduced. The integral coefficient of technical condition is defined as the ratio of the chart area of the engine under study to the area of a reference chart constructed using reference parameter values. The developed mathematical apparatus and applied method allow calculation of the integral indicator (for example, 39.47 %, corresponding to an unsatisfactory condition) and visual identification of the most degraded units based on geometric parameters of the chart. The proposed method enables the integration of heterogeneous diagnostic parameters into a single integral indicator and supports the transition from scheduled preventive maintenance to condition-based maintenance, thereby improving safety, reliability, and economic efficiency of marine power plants and other sources of mechanical energy.

Keywords: marine diesel engine, diagnostics, comprehensive assessment, integral indicator, multidimensional analysis, radar chart, technical condition.

For citation:

Afanaseva, Olga V. "Method for comprehensive assessment of the technical condition of marine diesel engines using multidimensional analysis." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 18.1 (2026): 128–138. DOI: 10.21821/2309-5180-2026-18-1-128-138.

УДК 629.5.03:519.233

МЕТОД КОМПЛЕКСНОЙ ОЦЕНКИ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ СУДОВЫХ ДИЗЕЛЬНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МНОГОМЕРНОГО АНАЛИЗА

О. В. Афанасьева

ГАОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный университет
аэрокосмического приборостроения», Санкт-Петербург, Россия

Проведена разработка комплексных подходов, обеспечивающих интегральную оценку их технического состояния в условиях перехода к системам прогнозного технического обслуживания, являющаяся актуальной при ужесточении экологических стандартов и требований к надежности дизельных двигателей. Основной исследуемой в работе проблемой является отсутствие комплексного подхода, позволяющего интегрировать разрозненные данные от разнородных диагностических систем в единую объективную оценку технического состояния судовых дизельных двигателей. Объектом исследования выступают процессы диагностирования судовых дизелей, предметом — существующие методы комплексной оценки их технического состояния. Целью исследования является разработка метода, обеспечивающего интегральную оценку и оперативную визуализацию технического состояния судового дизельного двигателя, количественную оценку степени его деградации, объективное сравнение технического состояния различных судовых дизельных двигателей и формализацию решений о необходимости ремонта. Для достижения поставленной цели решается задача согласования разнородных диагностических признаков (параметрических, виброакустических, данных анализа масел и др.) с различными единицами измерения и временными масштабами. В качестве основного метода решения задачи предложен подход, базирующийся на применении метода многомерного анализа. Основными этапами оценки являются: классификация диагностических параметров, их линейное нормирование для приведения к единой безразмерной шкале и преобразование многомерного диагностического пространства в двумерную визуальную модель — радарную диаграмму. Для количественной оценки технического состояния используется расчет площади этой диаграммы, модифицированный с введением весовых коэффициентов, отражающих значимость каждого параметра. Дополнительно вводятся коэффициенты, характеризующие асимметрию износа и равномерность деградации узлов. Интегральный коэффициент технического состояния судовых дизельных двигателей рассчитывается как отношение площади диаграммы исследуемого двигателя к площади эталонной диаграммы, построенной на эталонных значениях параметров двигателя. Главным результатом исследования является разработанный математический аппарат и прикладной метод, позволяющий не только рассчитывать интегральный показатель (например, в приведенном примере он составил 39,47 %, что соответствует неудовлетворительному состоянию), но и визуально идентифицировать наиболее деградирующие узлы по геометрическим параметрам диаграммы. Основной вывод заключается в том, что предложенный метод позволяет объединять разнородные диагностические параметры в единый интегральный показатель, визуализировать степень деградации различных узлов дизельного двигателя и прогнозировать его остаточный ресурс. Данный метод переход от субъективной качественной интерпретации разрозненных данных к объективному количественному анализу и может быть положен в основу перехода от планово-предупредительных ремонтов к обслуживанию по фактическому состоянию, что повышает безопасность, надежность и экономическую эффективность эксплуатации судовых энергетических установок и других источников механической энергии.

Ключевые слова: судовый дизельный двигатель, диагностика, диагностические параметры, многомерное диагностическое пространство, комплексная оценка, интегральный показатель, многомерный анализ, диаграмма, техническое состояние, классификация технического состояния.

Для цитирования:

Афанасьева О. В. Метод комплексной оценки технического состояния судовых дизельных двигателей с использованием многомерного анализа / О. В. Афанасьева // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2026. — Т. 18. — № 1. — С. 128–138. DOI: 10.21821/2309-5180-2026-18-1-128-138. — EDN YHOSKX.

Введение (Introduction)

Современные двигатели внутреннего сгорания функционируют в условиях постоянно ужесточающихся требований к надежности, экономичности и экологической безопасности [1–3]. Значимость своевременного обнаружения неисправностей в работе и конструкции двигателя заключается прежде всего в повышении безопасности его эксплуатации, предотвращении повреждений и продлении срока службы, что, в свою очередь, снижает затраты на эксплуатацию и техническое обслуживание двигателя.

Особый интерес представляют системы, предназначенные для обнаружения неисправностей в работе двигателя, основанные на анализе сигналов вибрации [4–6] или акустических сигналов [7, 8], создаваемых двигателем. Используемые в них методы включают: анализ сигналов в частотной области с использованием быстрого преобразования Фурье; анализ сигналов с использованием вейвлет-преобразования; методы разложения сигналов, такие как разложение

по эмпирическим, вариационным модам и анализ главных компонент [8, 9]. В последнее время все больший интерес вызывают системы, построенные на основе нейронных сетей, позволяющих обнаруживать неисправности в судовых системах и узлах [2, 10].

Основной проблемой современной диагностики дизельных двигателей является разрозненность оценок различных систем двигателя [11, 12]. При этом традиционные подходы к технической диагностике, основанные на анализе отдельных параметров, часто демонстрируют свою недостаточную информативность. Существующие методы позволяют с высокой точностью определять состояние отдельных узлов, но не обеспечивают комплексного представления о техническом состоянии двигателя в целом [13, 14]. Субъективность интерпретации разрозненных диагностических данных приводит к значительной вариативности оценок различных специалистов и, как следствие, к ошибкам в прогнозировании остаточного ресурса [15–17]. Необходимость интегрированной оценки многопараметрического состояния дизельных двигателей становится особенно острой при переходе к системам технического обслуживания по фактическому состоянию, где требуется оперативное принятие решений на основе комплексного анализа большого количества разнородных диагностических признаков.

Современная практика диагностирования дизельных двигателей базируется на применении специализированных методов анализа отдельных систем [12, 17], к которым относятся следующие.

1. Параметрические методы, основанные на анализе рабочих параметров, получаемых за счет совместного анализа нескольких параметров:

- метод сравнения с эталонными характеристиками, при котором оценка формируется по совокупности степени отклонения текущих параметров двигателя, например, мощности, расхода топлива, температуры выпускных газов по цилиндрам, давления сжатия, от паспортных данных или от характеристик, снятых при вводе двигателя в эксплуатацию;

- балансировый метод, основанный на составлении энергетического и материального балансов (теплового, воздушного, газового);

- метод параметров-признаков, основанный на комплексном анализе главных параметров, наиболее чутко реагирующих на изменение состояния (например, равномерности распределения нагрузок по цилиндрам, температуры выпускных газов перед турбиной, давления наддува).

2. Виброакустические методы, являющиеся мощным инструментом неразрушающего контроля, позволяющего оценить состояние скрытых элементов. К ним относятся:

- вибродиагностика, основанная на оценке изменений спектра вибраций двигателя (например, появлении новых гармоник и росте амплитуд на определенных частотах);

- акустическая эмиссия, при которой регистрируются высокочастотные упругие волны, возникающие при зарождении и развитии трещин, а также трении изношенных поверхностей.

3. Методы анализа рабочих жидкостей (трибодиагностика):

- спектральный анализ масла, при котором по концентрации элементов износа оценивают интенсивность износа конкретных пар трения, правильность работы системы очистки масла, остаточный ресурс масла;

- анализ феррографии, основанный на выделении и классификации частиц износа из масла по их размеру и форме.

4. Экспресс-методы и методы оперативного контроля:

- анализ дымности отработавших газов, который позволяет быстро и интегрально оценить качество смесеобразования и сгорания топлива, так как повышенная дымность является признаком неисправностей топливной аппаратуры, системы наддува или износа цилиндропоршневой группы;

- измерение компрессии в цилиндрах, напрямую характеризующей герметичность камеры сгорания и, следовательно, состояния поршневых колец, клапанов и уплотнений.

5. Математические (имитационные модели) и интеллектуальные методы:

- диагностирование по математическим моделям, при котором создается детальная математическая модель исправного эталонного двигателя, затем текущие параметры двигателя «про-

гоняются» через модель, а рассогласование между реальными и расчетными данными является мерой его технического состояния;

- нейросетевые технологии и машинное обучение, при котором нейронная сеть обучается на большом массиве данных (параметры двигателя, вибрации, анализы масла) как от исправных, так и от неисправных двигателей. После обучения такая система способна не просто констатировать отклонения, а указывать на наиболее вероятную неисправность и ее степень;
- экспертные системы, основанные на формализации знаний и опыта специалистов, построенные как базы знаний (такие системы выдают оценки на основе логических выводов).

Каждый из указанных методов оперирует собственными единицами измерения, различными временными масштабами и неодинаковой чувствительностью к изменению технического состояния дизельных двигателей. Это создает существенные трудности при формировании единого диагностического заключения по техническому состоянию двигателя. Таким образом, задача согласования разнородных диагностических признаков с целью оценки технического состояния дизельного двигателя в целом представляется актуальной.

Целью настоящего исследования является разработка научно-обоснованного метода интегральной оценки технического состояния судовых дизельных двигателей на основе многомерного анализа по основным метрологическим характеристикам.

Предлагаемый метод должен обеспечивать интегральную и оперативную визуализацию технического состояния двигателя, получение количественной оценки степени его деградации в целом, объективное сравнение технического состояния различных агрегатов, формализацию процесса принятия решений о необходимости проведения ремонтных работ.

Методы и материалы (Methods and Materials)

Для комплексной оценки технического состояния дизельного двигателя рассмотрим вектор диагностических параметров P , включающий измеряемые показатели всех исследуемых систем (элементов) двигателя: $P = (p_1, p_2, \dots, p_n)$, где p_i — текущие значения диагностических параметров.

Для приведения разнородных диагностических параметров (параметров с разной размерностью) к единой безразмерной шкале $[0; 1]$ применим метод линейного и обратного линейного нормирования:

$$r_i = \frac{p_i - p_{\min}}{p_{\max} - p_{\min}},$$

где $r_i \in [0; 1]$ — нормированное значение i -го параметра; p_i — текущее измеренное значение параметра; $p_{\min}$ — минимально допустимое значение параметра (нижний предел); $p_{\max}$ — максимально допустимое значение параметра (верхний предел).

Причем для параметров, изменение которых в большую сторону свидетельствует об ухудшении состояния (например, виброускорения или расхода масла), применяется обратное нормирование:

$$r_i = 1 - \frac{p_i - p_{\min}}{p_{\max} - p_{\min}}.$$

В качестве модели преобразования многомерного диагностического пространства в двумерную визуальную модель, адекватно отражающую техническое состояние двигателя, предлагается радарная диаграмма, представляющая собой выпуклый многоугольник в n -мерном пространстве диагностических параметров, где каждая вершина соответствует нормированному значению диагностического параметра. Радиус-вектор вершины определяется величиной r_i , угловое положение вершины равномерно распределено по окружности, угол для вершины i вычисляется по формуле

$$\Theta_i = (i-1) \frac{2\pi}{n},$$

где i — номер параметра, $i = 1, 2, \dots, n$.

За интегральный показатель технического состояния примем площадь радарной диаграммы S . Очевидно, что в случае, если площадь стремится к единице ($S \rightarrow 1$), то это соответствует идеальному состоянию двигателя; в случае, если площадь стремится к нулю ($S \rightarrow 0$), то это свидетельствует о критическом состоянии. Динамика изменения площади S позволяет отслеживать изменение технического состояния двигателя во времени. Для вычисления интегрального показателя технического состояния используется формула площади радарной диаграммы.

Расчет площади для многоугольника выполняется по формуле

$$S = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n r_i r_{i+1} \cdot \sin(\Theta_{i+1} - \Theta_i) = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n r_i r_{i+1} \cdot \sin\left(\frac{2\pi}{n}\right), \quad (1)$$

где r_i — нормированные значения диагностических параметров; n — количество диагностических параметров, $i = 1, 2, \dots, n$, при этом $r_{n+1} = r_1$.

Для практического применения в диагностике дизельных двигателей формула (1) модифицирована с введением весовых коэффициентов важности параметров:

$$S = \frac{1}{2} \cdot \sum_{i=1}^n w_i r_i w_{i+1} r_{i+1} \cdot \sin\left(\frac{2\pi}{n}\right),$$

где $w_i \in [0; 1]$ — весовой коэффициент, отражающий значимость i -го параметра для общей оценки технического состояния $\sum_{i=1}^n w_i = 1$.

Дополнительно введен коэффициент асимметрии K_a , характеризующий неравномерность износа систем двигателя:

$$K_a = \frac{P_{\max} - P_{\min}}{P_{\text{cp}}},$$

где $P_{\max}$, $P_{\min}$, P_{cp} — соответственно максимальное, минимальное и среднее арифметическое значение среди нормированных диагностических параметров r_i на момент оценки.

Интегральный коэффициент технического состояния судовых дизельных двигателей $k_{\text{ТС}}$ вычисляется по формуле

$$k_{\text{ТС}} = \frac{S_{\text{исслед}}}{S_{\text{эталон}}} \cdot 100 \%, \quad (2)$$

где $S_{\text{исслед}}$ — площадь диаграммы, построенной на исследуемых параметрах; $S_{\text{эталон}}$ — площадь диаграммы, построенной на эталонных значениях параметров двигателя.

Эталонная диаграмма формируется на основе нормативных значений параметров для нового двигателя (или двигателя после капитального ремонта) следующим образом.

1. Определение «идеального» состояния двигателя базируется на паспортных данных и результатах обкатки.

2. Эталонный многоугольник строится при $r_i = 1$ для всех параметров, что соответствует:

$$S_{\text{эталон}} = \frac{n}{2} \sin\left(\frac{2\pi}{n}\right),$$

где n — число параметров.

Эталонная диаграмма служит базой для сравнения и отражает состояние нового двигателя или после капитального ремонта, полностью исправного двигателя. Анализ диаграмм позволяет идентифицировать характерные геометрические отклонения для различных неисправностей. В табл. 1 приведен пример классификации технического состояния дизельного двигателя в зависимости от значения интегрального коэффициента технического состояния.

Таблица 1

Классификация технического состояния

Классификация состояния	Значение интегрального коэффициента технического состояния	Характеристика
Оптимальное	90 – 100 %	Все параметры в пределах паспортных значений, отсутствие развивающихся дефектов, рекомендуется плановое техническое обслуживание
Удовлетворительное	75 – 90 %	Незначительное отклонение отдельных параметров, наличие начальных стадий износа, требуется усиленный контроль и диагностика
Предельное	60 – 75 %	Существенное отклонение нескольких параметров, наличие развитых дефектов, необходимо запланировать ремонт
Неудовлетворительное	< 60 %	Критическое отклонение параметров, высокий риск отказа, необходим немедленный ремонт

В качестве дополнительных показателей вычисляются:

– коэффициент равномерности износа: $k_{\text{изн}} = 1 - \frac{\sigma}{\mu}$, где σ — среднее квадратическое отклонение нормированных диагностических параметров r_i на момент оценки; μ — среднее арифметическое значение всех нормированных диагностических параметров r_i ;

– индекс деградации: $D_{\text{деградации}} = 1 - k_{\text{изн}}^{(t/T_{\text{норм}})}$, где $k_{\text{изн}}$ — коэффициент равномерности износа, рассчитанный на текущий момент (по последним данным диагностики); t — фактическая наработка двигателя (например, с момента последнего капитального ремонта), выраженная в тысячах часов (тыс. ч); $T_{\text{норм}}$ — нормативная (расчетная) наработка двигателя (например, до момента капитального ремонта), выраженная в тысячах часов (тыс. ч).

Результаты (Results)

Для иллюстрации метода рассмотрим модельный пример с четырнадцатью диагностическими параметрами (номинальная мощность, кВт; удельный расход топлива, г/(кВт·ч); частота вращения (номин.), об/мин; частота вращения (XX), об/мин; температура охлаждающей жидкости, °C; температура масла, °C; температура отработавших газов, °C; давление масла, МПа; противодействие газов, кПа; СКЗ виброскорости, мм/с; СКЗ виброускорения, м/с²; уровень шума, дБА; максимальный момент, Н·м; угар масла, г/кВт·ч). Исходные данные приведены в табл. 2.

Таблица 2

Исходные данные для примера

№ п/п.	Результаты измерения	Минимальное значение	Максимальное значение	Нормированное значение	Угол θ_i
1	18,1	17,1	18,5	0,7333	0
2	248	240	255	0,5333	$2\pi / 14 \approx 0,44879895$
3	1500	1480	1520	0,5000	$4\pi / 14 \approx 0,89759790$
4	600	580	620	0,5000	$6\pi / 14 \approx 1,34639685$
5	87	75	90	0,8000	$8\pi / 14 \approx 1,79519580$
6	88	75	90	0,8667	$10\pi / 14 \approx 2,24399475$
7	480	450	550	0,3000	$12\pi / 14 \approx 2,69279370$
8	0,39	0,25	0,45	0,7000	$\pi \approx 3,14159265$
9	2,9	2,0	3,5	0,6000	$16\pi / 14 \approx 3,59039160$
10	3,9	2,0	5,0	0,6333	$18\pi / 14 \approx 4,03919055$
11	19	10,0	30	0,4500	$20\pi / 14 \approx 4,48798950$
12	93	85	95	0,8000	$22\pi / 14 \approx 5,93678845$
13	102	95	105	0,7000	$24\pi / 14 \approx 6,38558740$
14	1,6	0,5	2,0	0,7333	$26\pi / 14 \approx 6,83438635$

Угол между соседними лучами: $\Delta\Theta_i = \frac{2\pi}{n} = \frac{2 \cdot 3,1415926535}{14} \approx 0,44879895$ рад.

Площадь многоугольника в полярных координатах вычисляется по формуле

$$S = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n r_i r_{i+1} \cdot \sin(\Theta_{i+1} - \Theta_i) = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n r_i r_{i+1} \cdot \sin\left(\frac{2\pi}{n}\right) = \frac{1}{2} \sin\left(\frac{2\pi}{n}\right) \cdot \sum_{i=1}^n r_i r_{i+1}.$$

Вершина с номером 15 — это снова вершина 1, для замыкания фигуры, то есть $r_{15} = r_1$. В данном примере получили, что $\sin(0,44879895) \approx 0,433883$.

Вычислив произведения $(r_i \cdot r_{i+1})$, получим:

$$\begin{aligned} r_1 \cdot r_2 &= 0,7333 \cdot 0,5333 = 0,3911; & r_2 \cdot r_3 &= 0,5333 \cdot 0,5000 = 0,2667; & r_3 \cdot r_4 &= 0,5000 \cdot 0,5000 = 0,2500; \\ r_4 \cdot r_5 &= 0,5000 \cdot 0,8000 = 0,4000; & r_5 \cdot r_6 &= 0,8000 \cdot 0,8667 = 0,6934; & r_6 \cdot r_7 &= 0,8667 \cdot 0,3000 = 0,2600; \\ r_7 \cdot r_8 &= 0,3000 \cdot 0,7000 = 0,2100; & r_8 \cdot r_9 &= 0,7000 \cdot 0,6000 = 0,4200; & r_9 \cdot r_{10} &= 0,6000 \cdot 0,6333 = 0,3800; \\ r_{10} \cdot r_{11} &= 0,6333 \cdot 0,4500 = 0,2850; & r_{11} \cdot r_{12} &= 0,4500 \cdot 0,8000 = 0,3600; & r_{12} \cdot r_{13} &= 0,8000 \cdot 0,7000 = 0,5600; \\ r_{13} \cdot r_{14} &= 0,7000 \cdot 0,7333 = 0,5133; & r_{14} \cdot r_1 &= 0,7333 \cdot 0,7333 = 0,5377. \end{aligned}$$

Тогда площадь многоугольника будет равна:

$$S = \frac{1}{2} \cdot 0,433883 \cdot 5,5272 \approx 1,1989.$$

Заметим, что максимально возможная площадь для 14-угольника с $r_i = 1$ составляет

$$S_{\text{эталон}} = \frac{n}{2} \cdot \sin\left(\frac{2\pi}{n}\right) = 7 \cdot 0,433883 = 3,0372.$$

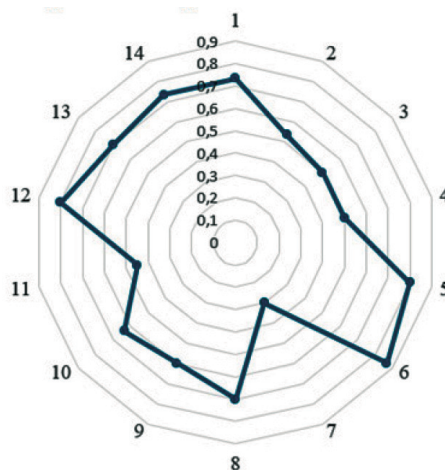
Тогда относительная площадь будет равна

$$S_{\text{относит}} = \frac{S_{\text{исслед}}}{S_{\text{эталон}}} = \frac{1,1989}{3,0372} = 0,3947.$$

Вычислим интегральный коэффициент технического состояния по формуле

$$k_{\text{ТС}} = \frac{S_{\text{исслед}}}{S_{\text{эталон}}} \cdot 100 \% = 39,47 \ %.$$

На рисунке представлена радарная диаграмма технического состояния дизельного двигателя.



Радарная диаграмма технического состояния
дизельного двигателя

Анализ диаграммы позволяет идентифицировать характерные геометрические отклонения, характерные для различных неисправностей. В рассмотренном примере диаграмма имеет сильно выраженную асимметрию с «проседанием» в области 7-, 11-, 3- и 4-го показателей (значения № 7 (30,0 %), № 11 (45,0 %), № 3 и № 4 (50,0 %)) и «всплесками» в области 6-, 5- и 12-го показателей (значения № 6 (86,67 %), № 5 (80,0 %), № 12 (80,0 %)). Площадь составляет примерно 39,5 % от максимально возможной площади для четырнадцатиугольника. На основе результатов анализа можно сформулировать общую оценку: состояние двигателя неудовлетворительное (менее 60 %), требуется срочная диагностика и ремонт систем, соответствующих параметрам № 3, № 4, № 7 и № 11.

Обсуждение (Discussion)

Формула (1) позволяет вычислить площадь радарной диаграммы, рассматриваемой как объединение треугольников с общей вершиной в центре. По ней выполняется вычисление площади многоугольника, включая области, где лучи пересекаются. В случае, если необходимо вычислить площадь многоугольника с учетом пересечений, то предварительно необходимо осуществить переход к декартовым координатам. При этом вычисления необходимо проводить, используя формулу Гаусса. Тогда площадь многоугольника вычисляется по следующей формуле:

$$S = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n (x_i y_{i+1} - x_{i+1} y_i),$$

где $x_i = r_i \cdot \cos \Theta_i$, $y_i = r_i \cdot \sin \Theta_i$, $\Theta_i = (i-1) \frac{2\pi}{n}$ и $x_{n+1} = x_1$, $y_{n+1} = y_1$.

В приведенном примере вершины многоугольника определяются в полярных координатах: $A_1(r_1, \Theta_1)$, $A_2(r_2, \Theta_2)$, ..., $A_{14}(r_{14}, \Theta_{14})$. Представим исходные данные в декартовых координатах (табл. 3).

Таблица 3

Численные значения для всех слагаемых в декартовых координатах

Номер вершины (i)	Координаты вершины	
	$x_i = r_i \cdot \cos \Theta_i$	$y_i = r_i \cdot \sin \Theta_i$
1	$0,7333 \cdot 1 = 0,733300$	$0,7333 \cdot 0 = 0$
2	$0,5333 \cdot 0,900969 \approx 0,480187$	$0,5333 \cdot 0,433884 \approx 0,231310$
3	$0,5000 \cdot 0,623490 \approx 0,311745$	$0,5000 \cdot 0,781831 \approx 0,390916$
4	$0,5000 \cdot 0,222521 \approx 0,111260$	$0,5000 \cdot 0,974928 \approx 0,487464$
5	$0,8000 \cdot (-0,222521) \approx -0,178017$	$0,8000 \cdot 0,974928 \approx 0,779942$
6	$0,8667 \cdot (-0,623490) \approx -0,540379$	$0,8667 \cdot 0,781831 \approx 0,677613$
7	$0,3000 \cdot (-0,900969) \approx -0,270291$	$0,3000 \cdot 0,433884 \approx 0,130165$
8	$0,7000 \cdot (-1) \approx -0,700000$	$0,7000 \cdot 0 = 0$
9	$0,6000 \cdot (-0,900969) \approx -0,540581$	$0,6000 \cdot (-0,433884) \approx -0,260330$
10	$0,6333 \cdot (-0,623490) \approx -0,394857$	$0,6333 \cdot (-0,781831) \approx -0,495034$
11	$0,4500 \cdot (-0,222521) \approx -0,100134$	$0,4500 \cdot (-0,974928) \approx -0,438718$
12	$0,8000 \cdot 0,222521 \approx 0,178017$	$0,8000 \cdot (-0,974928) \approx -0,779942$
13	$0,7000 \cdot 0,623490 \approx 0,436443$	$0,7000 \cdot (-0,781831) \approx -0,547282$
14	$0,7333 \cdot 0,900969 \approx 0,660680$	$0,7333 \cdot (-0,433884) \approx -0,318167$

Тогда площадь многоугольника, вычисленная в декартовых координатах по формуле Гаусса, составит

$$S = (1/2) \cdot 2,392450 = 1,196225.$$

Максимально возможная площадь для 14-угольника с $r_i=1$:

$$S = (n/2) \cdot \sin(2\pi/n) = 7 \cdot \sin(0,44879895) = 7 \cdot 0,433883 = 3,0372.$$

Относительная площадь:

$$S_{\text{относительная}} = \frac{1,196225}{3,0372} = 0,3939.$$

Это значение очень близко к значению, полученному ранее через полярные координаты, что подтверждает корректность обоих методов. Небольшая разница является следствием накопления ошибок округления на каждом этапе вычислений (особенно при округлении значений косинусов и синусов). Для инженерных целей оба результата являются верными, но расчет в декартовых координатах считается более прямым и фундаментальным. Заметим, что количество контролируемых параметров зависит от целей исследования и имеющихся для этого исходных данных. При этом полученные результаты будут обладать определенной точностью и достоверностью. Например, в работе [9] на основе теории подобия и анализа размерностей для оценки технического состояния только элементов цилиндропоршневой группы дизелей речного флота было построено критериальное уравнение с четырнадцатью параметрами. Минимальное число диагностических параметров будет определяться объемом исходных диагностической информации.

Заключение (Conclusion)

Современный подход к интегральной оценке технического состояния судового дизельного двигателя заключается в комплексном применении существующих разнородных способов. Данные параметрических систем мониторинга в реальном времени дополняются периодическим виброакустическим контролем и химическим анализом масел. Эта информация поступает в математическую и нейросетевую модели, которые выдают итоговую интегральную оценку остаточного ресурса и рекомендации по дальнейшей эксплуатации двигателя.

Внедрение комплексных интеллектуальных систем диагностики дизельных двигателей позволяет перейти от планово-предупредительных ремонтов к ремонтам по фактическому состоянию, что является условием безопасности их эксплуатации и экономической эффективности.

Таким образом, в работе представлены следующие результаты исследования:

1. Для формализации диагностических параметров предложена система нормирования разнородных диагностических признаков и их классификация по функциональным группам влияния на работоспособность дизельных двигателей.
2. Предложенная математическая модель преобразования многомерного диагностического пространства в двумерную визуальную модель, адекватно отражающую техническое состояние двигателя, что позволяет не только количественно оценить его текущее техническое состояние, но и по форме диаграммы идентифицировать наиболее деградирующие системы и узлы.
3. Предложены математическая модель оценки и расчетные зависимости для количественного определения интегральных показателей технического состояния дизельного двигателя.

Предлагаемый подход позволяет перейти от субъективной качественной оценки к объективному количественному анализу технического состояния судовых дизельных двигателей, что имеет существенное значение для повышения эффективности систем технической эксплуатации судовых энергетических установок и стационарных источников механической энергии.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Онищенко И. С. Обзор развития требований по обеспечению безопасности эксплуатации судов внутреннего плавания / И. С. Онищенко // Вестник государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2025. — Т. 17. — № 1. — С. 75–85. DOI: 10.21821/2309-5180-2025-17-1-75-85. — EDN VWLOBD.

2. Tian X. Construction of Knowledge Graph for Marine Diesel Engine Faults Based on Deep Learning Methods / X. Tian, H. Gan, Y. Liu // *Journal of Marine Science and Engineering*. — 2025. — Vol. 13. — Is. 4. DOI: 10.3390/jmse13040693.
3. Медведев В. В. Обзор и анализ возможностей различных способов повышения энергетической эффективности судов / В. В. Медведев, В. В. Гаврилов, С. Н. Киселев // *Морские интеллектуальные технологии*. — 2018. — № 2–1(40). — С. 94–103. — EDN XSHLHF.
4. Afanaseva O. Vibration-Based Condition Monitoring of Diesel Engines in Industrial Energy Applications: A Scoping Review / O. Afanaseva, D. Pervukhin, A. Khatrusov // *Energies*. — 2025. — Vol. 18. — Is. 21. DOI: 10.3390/en18215717.
5. Баркова Н. А. Основные направления развития вибрационной диагностики судовых машин / Н. А. Баркова, Д. В. Грищенко // *Актуальные проблемы морской энергетики: материалы шестой международной межотраслевой научно-технической конференции, 16–17 февраля 2017 г.* — Санкт-Петербург: СПбГМТУ, 2017. — С. 24–27.
6. Грищенко Д. В. Автоматическая обработка узкополосных спектров вибрации судовых машин в целях выделения диагностически значимых компонент / Д. В. Грищенко // *Морские интеллектуальные технологии*. — 2016. — № 4–2(34). — С. 8–13. — EDN YLOGZJ.
7. Radi J. Spectral-Based Fault Detection Method in Marine Diesel Engine Operation / J. Radić, M. Šarić, A. Rubić // *Sensors*. — 2025. — Vol. 25. — Is. 18. DOI: 10.3390/s25185669.
8. Mathew S. K. Acoustic-Based Engine Fault Diagnosis Using WPT, PCA and Bayesian Optimization / S. K. Mathew, Y. Zhang // *Applied Sciences*. — 2020. — Vol. 10. — Is. 19. DOI: 10.3390/app10196890.
9. Тузов Л. В. Вибрация судовых двигателей внутреннего сгорания / Л. В. Тузов, О. К. Безюков, О. В. Афанасьева. — Санкт-Петербург: Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого», 2012. — 348 с. — EDN QNYGXR.
10. Yang X. A Multiple Attention Convolutional Neural Networks for Diesel Engine Fault Diagnosis / X. Yang, F. Bi, J. Cheng, D. Tang, P. Shen, X. Bi // *Sensors*. — 2024. — Vol. 24. — Is. 9. DOI: 10.3390/s24092708.
11. Ерофеев П. А. Классификация современных методов совершенствования рабочего процесса судовых дизелей / П. А. Ерофеев, В. А. Жуков, С. Г. Черный // *Вестник государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова*. — 2020. — Т. 12. — № 4. — С. 765–774. DOI: 10.21821/2309-5180-2020-12-4-765-774. — EDN JQBJAN.
12. Жуков В. А. Системы мониторинга и диагностики элементов судовых энергетических установок / В. А. Жуков, А. А. Буцанец, В. В. Гаврилов, С. А. Щербан // *Морская радиоэлектроника*. — 2021. — № 1(75). — С. 22–27. — EDN OJXXBA.
13. Кочергин В. И. Использование характеристик термодинамических процессов для оценки технического состояния дизельных энергетических установок / В. И. Кочергин, С. П. Глушков, Е. С. Зинченко // *Вестник государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова*. — 2024. — Т. 16. — № 1. — С. 141–153. DOI: 10.21821/2309-5180-2024-16-1-141-153. — EDN SNJEBX.
14. Мазур Е. В. Разработка алгоритма комплексной методики оценки технического состояния цилиндропоршневой группы судовой двигательной установки на основе показателей масляной системы / Е. В. Мазур, Н. Л. Великанов, Г. Е. Ананьев // *Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Морская техника и технология*. — 2024. — № 1. — С. 72–83. DOI: 10.24143/2073-1574-2024-1-72-83. — EDN YWTJFD.
15. Герике П. Б. Вибродиагностика центробежных насосов / П. Б. Герике, А. Г. Никитин // *Вестник научно-центра по безопасности работ в угольной промышленности*. — 2020. — № 4. — С. 83–89. — EDN HMSLON.
16. Ariefjewe I. B. Graph-analytical method for assessing the state of the object being diagnosed / I. B. Ariefjewe // *Russian Journal of Logistics & Transport Management*. — 2020. — Vol. 5. — Is. 1. — Pp. 10–18. — EDN PAJZOI.
17. Кулагин А. В. Диагностирование состояния судовых дизельных двигателей вероятностным методом распознавания неисправностей / А. В. Кулагин // *Научные проблемы водного транспорта*. — 2021. — № 69. — С. 109–122. DOI: 10.37890/jwt.vi69.220. — EDN VYAMDP.

REFERENCES

1. Onischenko, I. S. “Review of the development of requirements to ensure the safe operation of inland waterway vessels.” *Vestnik gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admiral S. O. Makarova* 17.1 (2025): 75–85. DOI: 10.21821/2309-5180-2025-17-1-75-85.

2. Tian, X., H. Gan and Y. Liu. "Construction of Knowledge Graph for Marine Diesel Engine Faults Based on Deep Learning Methods." *Journal of Marine Science and Engineering* 13.4 (2025). DOI: 10.3390/jmse13040693.
3. Medvedev, V. V., V. V. Gavrilov and S. N. Kiselev. "Review and analysis of the possibility of various methods of increasing the energy efficiency of vessels." *Marine Intelligent Technologies* 2–1(40) (2018): 94–103.
4. Afanaseva, O., D. Pervukhin and A. Khatrusov. "Vibration-Based Condition Monitoring of Diesel Engines in Industrial Energy Applications: A Scoping Review." *Energies* 18.21 (2025). DOI: 10.3390/en18215717.
5. Barkova, N. A. and D. V. Grischenko. "Osnovnye napravleniya razvitiya vibratsionnoy diagnostiki sudovykh mashin." *Aktual'nye problemy morskoy energetiki: materialy shestoy mezhdunarodnoy mezhotraslevoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii, 16–17 fevralya 2017 g.* Sankt-Peterburg: SPbGMTU, 2017: 24–27.
6. Grischenko, D. V. "Avtomaticeskaya obrabotka uzkopolosnykh spektrov vibratsii sudovykh mashin v tselyakh vydeleniya diagnosticheskikh znachimykh komponent." *Marine Intelligent Technologies* 4–2(34) (2016): 8–13.
7. Radi, J., M. Šarić and A. Rubić. "Spectral-Based Fault Detection Method in Marine Diesel Engine Operation." *Sensors* 25.18 (2025). DOI: 10.3390/s25185669.
8. Mathew, S. K. and Y. Zhang. "Acoustic-Based Engine Fault Diagnosis Using WPT, PCA and Bayesian Optimization." *Applied Sciences* 10.19 (2020). DOI: 10.3390/app10196890.
9. Tuzov, L. V., O. K. Bezyukov and O. V. Afanas'eva. *Vibratsiya sudovykh dvigateley vnutrennego sgoraniya.* Sankt-Peterburg: Federal'noe gosudarstvennoe avtonomnoe obrazovatel'noe uchrezhdenie vysshego obrazovaniya "Sankt-Peterburgskiy politekhnicheskii universitet Petra Velikogo", 2012: 348.
10. Yang, X., X. Bi et al. "A Multiple Attention Convolutional Neural Networks for Diesel Engine Fault Diagnosis." *Sensors* 24.9 (2024). DOI: 10.3390/s24092708.
11. Erofeev, P. A., V. A. Zhukov and S. G. Chernyy. "Classification of modern methods for improving the working process of marine diesel engine." *Vestnik gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 12.4 (2020): 765–774. DOI: 10.21821/2309-5180-2020-12-4-765-774.
12. Zhukov, V. A., A. A. Butsanets, V. V. Gavrilov and S. A. Scherban. "Monitoring systems and diagnostics of ship power plant components." *Marine Radioelectronics* 1(75) (2021): 22–27.
13. Kochergin, V. I., S. P. Glushkov and E. S. Zinchenko. "Using the thermodynamic processes features to assess the diesel power plants technical condition." *Vestnik gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 16.1 (2024): 141–153. DOI: 10.21821/2309-5180-2024-16-1-141-153.
14. Mazur, E. V., N. L. Velikanov and G. E. Anan'ev. "Development of the algorithm for a comprehensive methodology for assessing the technical condition of a marine propulsion system cylinder piston group based on the indicators of the oil system." *Vestnik of Astrakhan State Technical University. Series: Marine Engineering and Technologies* 1 (2024): 72–83. DOI: 10.24143/2073-1574-2024-1-72-83.
15. Gerike, P. B. and A. G. Nikitin. "Vibration-based diagnostics of centrifugal pumps." *Bulletin of Research Center For Safety in Coal Industry (Industrial Safety)* 4 (2020): 83–89.
16. Ariefjew, I. B. "Graph-analytical method for assessing the state of the object being diagnosed." *Russian Journal of Logistics & Transport Management* 5.1 (2020): 10–18.
17. Kulagin, A. V. "Diagnosing the state of marine diesel engines by probabilistic fault recognition method." *Russian Journal of Water Transport* 69 (2021): 109–122. DOI: 10.37890/jwt.vi69.220.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Афанасьева Ольга Владимировна —
кандидат технических наук, доцент
ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский
государственный университет аэрокосмического
приборостроения»,
190000, Россия, Санкт-Петербург,
Большая Морская ул., 67
e-mail: ovaf72@guap.ru, Ovaf72@gmail.com

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Afanaseva Olga V. —
PhD in Technical Sciences,
Associate Professor
St. Petersburg State University
of Aerospace Instrumentation
190000, Russia, St. Petersburg,
Bolshaya Morskaya st., 67
e-mail: ovaf72@guap.ru, Ovaf72@gmail.com

Статья поступила в редакцию: 19 декабря 2025 г.

Received: Dec. 19, 2025

АВТОМАТИЗАЦИЯ И УПРАВЛЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ПРОЦЕССАМИ И ПРОИЗВОДСТВАМИ

DOI: 10.21821/2309-5180-2026-18-1-139-151

EDN ZTGHDB

AN INTELLIGENT DIAGNOSTIC SYSTEM FOR SHIPBOARD EQUIPMENT USING THE MODE DECOMPOSITION AND MACHINE LEARNING METHODS

L. N. Tyndykar

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

This study presents an integrated signal processing and machine learning framework for automatic status prediction of shipboard equipment. The research investigates the utilization of advanced mode decomposition techniques, with a particular focus on the integration of the Hilbert-Huang Transform (HHT) with state-of-the-art machine learning algorithms. The proposed approach is based on adaptive time-frequency decomposition, employing HHT methods in conjunction with Variational Mode Decomposition (VMD) algorithms. These techniques enable precise analysis of the functional characteristics of operating modes while mitigating the adverse effects of noise contamination. The decomposed components are used as input for neural network training, with careful selection of network architecture to identify characteristic malfunctions of shipboard equipment. Special emphasis is placed on the VMD-KAN-LSTM hybrid architecture, which combines preprocessing based on VMD using the Kolmogorov-Arnold Network (KAN) with the Long Short-Term Memory (LSTM) model. This hybrid architecture effectively captures non-linear interactions between system components and temporal dependencies inherent in the data. The efficacy of the proposed methodology was evaluated through experimental validation using data from a marine reciprocating compressor. Comparative experiments, employing LSTM combined with VMD-KAN and alternative methods, demonstrated that the integration of VMD significantly improves classification accuracy in the presence of interfering noise. Notably, the VMD-KAN-LSTM architecture exhibited the highest diagnostic accuracy among the models tested. The findings emphasize the benefits of decomposition methods for monitoring and predictive maintenance of shipboard equipment and demonstrate that combining time-frequency analysis with machine learning provides a robust approach for ensuring operational reliability and longevity of critical marine systems.

Keywords: technical system diagnostics, shipboard technical equipment, vibration-acoustic signals, Hilbert-Huang Transform, time-frequency decomposition, machine learning, fault diagnosis, vibration spectra, modulating component, mode decomposition.

For citation:

Tyndykar, Ljubov N. "An intelligent diagnostic system for shipboard equipment using the mode decomposition and machine learning methods." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 18.1 (2026): 139–151. DOI: 10.21821/2309-5180-2026-18-1-139-151.

УДК 621.1.016:629.5.015:004.85

ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНАЯ СИСТЕМА ДИАГНОСТИКИ СУДОВЫХ ТЕХНИЧЕСКИХ СРЕДСТВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МЕТОДОВ МОДОВОЙ ДЕКОМПОЗИЦИИ И МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ

А. Н. Тындыкаръ

ФГБОУ ВО «Государственный университет морского и речного флота
имени адмирала С. О. Макарова», Санкт-Петербург, Российская Федерация

В работе предлагается интегрированная система обработки сигналов и машинного обучения, предназначенная для автоматизации диагностики и прогнозирования состояния судовых технических средств.

Рассмотрены варианты модовой декомпозиции, возможности интеграции преобразования Гильберта — Хуанга (Hilbert — Huang Transform (HHT)) с методами машинного обучения. Рассматриваемый подход основан на адаптивной частотно-временной декомпозиции, включающей методы HHT совместно с алгоритмами вариационной модовой декомпозиции (Variational Mode Decomposition, VMD), которые позволяют провести анализ функциональных характеристик режима работы и минимизировать влияние шумовых искажений. Полученные в результате декомпозиции компоненты передаются в качестве входных данных для обучения нейронной сети. Обоснован выбор архитектуры нейронной сети для выявления характерных неисправностей судовых технических средств. Особое внимание в исследовании уделено гибридной архитектуре VMD-KAN-LSTM, которая объединяет предварительную обработку на основе вариационной модовой декомпозиции с применением сети Колмогорова — Арнольда (Kolmogorov — Arnold Network, KAN) и модели долговременной кратковременной памяти (Long Short — Term Memory, LSTM). Данная архитектура позволяет учитывать нелинейные взаимодействия между объектами и временные зависимости в данных. Эффективность предложенной методики оценена в ходе эксперимента на основе данных, полученных с судового поршневого компрессора. Проведенные сравнительные эксперименты с использованием модели LSTM совместно с вариационной модовой декомпозицией с применением сети Колмогорова — Арнольда и аналогов показали, что применение метода вариационной модовой декомпозиции значительно улучшает качество классификации в условиях наличия помех. Архитектура VMD-KAN-LSTM продемонстрировала наивысшую точность диагностики среди рассмотренных моделей. Результаты исследования подтверждают эффективность применения методов декомпозиции для мониторинга и прогнозирования технического состояния судовых технических средств.

Ключевые слова: диагностика технических систем, судовые технические средства, виброакустические сигналы, преобразование Гильберта — Хуанга, частотно-временное распределение, машинное обучение, диагностика отказов, спектры вибраций, модулирующая составляющая, модовая декомпозиция.

Для цитирования:

Тындыкарь Л. Н. Интеллектуальная система диагностики судовых технических средств с использованием методов модовой декомпозиции и машинного обучения / Л. Н. Тындыкарь // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2026. — Т. 18. — № 1. — С. 139–151. DOI: 10.21821/2309-5180-2026-18-1-139-151. — EDN ZTGHDB.

Введение (Introduction)

Основной задачей классификации состояний судовых технических средств является точное и своевременное определение необходимости проведения технического обслуживания, ремонта или замены компонентов. В практической деятельности состояния систем принято подразделять на четыре класса: нормальное, допустимое, недопустимое и аварийное. В настоящее время оценка технического состояния и диагностика отказов во многом основаны на визуальном анализе измеренных спектров вибраций на характерных частотах, выполняемом операторами диагностического оборудования. Подобный визуальный анализ по своей природе является субъективным, трудоемким и сопряжен с риском ошибок и пропусков дефектов.

Развитие методов виброакустической диагностики обусловлено необходимостью снижения зависимости от экспертного опыта и объема баз данных с возможностью частичной автоматизации контроля [1–3]. Данная задача особенно актуальна для крупномасштабных или критически важных для безопасности систем, где необходимо обеспечить согласованность и объективность принимаемых решений.

Большинство дефектов на контактирующих поверхностях вызывают определенные виды модуляции вибраций в окрестностях частот возбуждения [1, 2]. Для дефектов на ранней стадии или слабовыраженных дефектов энергия вибраций в основном сосредоточена в высокочастотной области спектра и зачастую соизмерима с уровнем шума. В результате идентификация боковых полос модуляции в исходном спектре становится чрезвычайно сложной, что предъявляет высокие требования к квалификации и опыту как оператора, так и аналитика.

Во многих случаях наиболее диагностически значимую информацию несет модулирующая составляющая, тогда как параметры модулируемой (несущей) составляющей часто можно не учитывать. При цифровой обработке сигналов операция детектирования, как правило, реализуется алгоритмически с использованием соответствующих модификаций преобразования Гильберта. Нали-

чие дефектов проявляется в виде дискретных спектральных составляющих, выделяющихся на фоне сплошного шума, которые идентифицируются на основе их геометрических характеристик и частот вращения. Однако следует отметить, что амплитуды, наблюдаемые на частотах возбуждения в спектре огибающей, часто не соответствуют напрямую реальным амплитудам вибраций.

Таким образом, периодическая модуляция служит ключевым индикатором развития дефекта не только в узлах трения, но и в широком спектре других компонентов системы. Тип дефекта определяется частотами модуляции, представленными гармоническими составляющими в спектре огибающей, тогда как степень его тяжести связана с глубиной модуляции. Существенным ограничением анализа огибающей является высокий уровень шума, вносимого составляющими, не связанными с развитием локального дефекта, что требует привлечения высококвалифицированного персонала для надежной интерпретации результатов [4].

Целью настоящего исследования является разработка интеллектуальной системы, способной повысить качество классификации состояний механизмов судовых технических средств на основе диагностических признаков, представленных спектральными компонентами. В ходе исследования рассмотрены варианты модовой декомпозиции, возможности интеграции преобразования Гильберта – Хуанга с методами машинного обучения и обоснован выбор архитектуры нейронной сети для выявления характерных неисправностей судовых технических средств (на примере эксплуатационного мониторинга поршневого компрессора).

Методы и материалы (Methods and Materials)

Преобразование Гильберта – Хуанга (ННТ) включает два ключевых этапа: эмпирическую модовую декомпозицию (*EMD*) и спектральный анализ Гильберта [5–7].

На первом этапе сигнал раскладывается на набор интермодальных функций (*IMF*), представляющих собой адаптивные колебательные компоненты, эффективно моделирующие поведение сигнала в конкретной полосе частот, что делает их важным инструментом для анализа динамических систем. В отличие от классических ортогональных базисных функций, используемых в вейвлет-преобразовании, *IMF* формируются непосредственно из исходных данных, что обеспечивает их адаптивность и способность точно отражать локальные особенности сигнала. Этот подход позволяет избежать необходимости предварительного задания базисных функций, что делает *IMF* особенно привлекательными для задач, требующих высокой степени гибкости и точности в анализе сложных сигналов. Такой характер, основанный на данных, обеспечивает высокую степень соответствия между декомпозицией и физическими характеристиками анализируемого сигнала.

Процедура декомпозиции, подробно рассмотренная в работе [8], состоит из ряда шагов, в результате которых исходный сигнал $x(t)$ может быть представлен в виде суммы n интермодальных функций и остаточной компоненты $r_n(t)$:

$$x(t) = \sum_{i=1}^n IMF_i(t) + r_n(t), \quad (1)$$

где $IMF_i(t)$ — i -е интермодальные функции; $r_n(t)$ — остаток.

Каждую *IMF* можно интерпретировать как локально адаптивную синусоидальную компоненту, которая отражает характерное поведение сигнала в определенном частотно-временном диапазоне. Особо важным свойством *IMF* является то, что каждую компоненту можно анализировать с точки зрения мгновенной амплитуды и мгновенной частоты. Это позволяет перейти ко второму этапу — построить спектр Гильберта — высокоразрешающее частотно-временное представление сигнала.

С момента своего создания метод преобразования Гильберта – Хуанга подвергся значительным модификациям, эволюционировав из первоначальной версии, ориентированной исключительно на обработку одномерных сигналов, в современное высокоадаптивное и модульное программное обеспечение, позволяющее осуществлять комплексный анализ данных в широком спектре прикладных областей.

Вариационная модовая декомпозиция (Variational Mode Decomposition (VMD)) основана на решении задачи условной вариационной оптимизации, в рамках которой сигнал раскладывается на заранее заданное число мод, каждая из которых имеет ограниченную полосу пропускания и центрирована вокруг своей собственной характерной частоты. Алгоритм *VMD* выделяется отсутствием итеративных процедур фильтрации, демонстрируя высокую эффективность в подавлении шума. Он обладает способностью к параллельной обработке и ускоренным вычислениям, обеспечивая при этом точный контроль над количеством извлекаемых мод. Эти характеристики делают *VMD* мощным инструментом для анализа и обработки сигналов, что подтверждено многочисленными научными исследованиями и возможностью практического применения в различных областях. *VMD* особенно хорошо подходит для приложений, требующих контролируемого и стабильного разложения, таких как прогнозная аналитика, диагностика отказов, распознавание образов и анализ финансовых временных рядов.

Многомерная эмпирическая модовая декомпозиция (Multivariate Empirical Mode Decomposition (MEMD)) разработана для расширения *EMD* с одномерных сигналов на многомерные данные, например, синхронно регистрируемые измерения с нескольких датчиков. *MEMD* сохраняет межканальную когерентность и обеспечивает согласованное совместное разложение. Метод многоканальной эмпирической модовой декомпозиции зарекомендовал себя как высокоэффективный инструмент для анализа многоканальных сигналов, при этом обеспечивая сохранение временного и фазового соответствия между модами, извлеченными из различных каналов. Примечательно, что данный методологический подход характеризуется высокой степенью устойчивости к межканальным помехам, что значительно повышает его релевантность для приложений, требующих детального изучения сложных и явных взаимозависимостей между сигналами, поступающими из множества источников.

Двумерная эмпирическая модовая декомпозиция (Bidimensional Empirical Mode Decomposition (BEMD)) предназначена для анализа двумерных данных, включая изображения, пространственные карты и видеокadres. Этот подход позволяет:

- декомпонировать изображения на СМФ, представляющие структуры на разных пространственных масштабах;
- извлекать текстурные и структурные признаки;
- эффективно подавлять шум и повышать качество визуальных данных.

Несмотря на продемонстрированную чувствительность и эффективность при обработке нестационарных временных рядов в результате практического применения базового *HTT* был выявлен ряд ограничений, включая смещение мод, высокую чувствительность к шумовым воздействиям, наличие краевых эффектов и отсутствие строго формализованной математической модели. Для устранения этих проблем был предложен ряд модифицированных и расширенных версий метода, каждая из которых направлена на преодоление конкретных недостатков исходного подхода [9–12].

Ансамблевая эмпирическая модовая декомпозиция (Ensemble Empirical Mode Decomposition (EEMD)) представляет собой инновационную модификацию традиционного метода *HTT*, разработанную для преодоления проблемы перекрытия мод, возникающей в случаях, когда одна *IMF* (интрамодальная частотная компонента) содержит колебания из нескольких частотных областей. Эта проблема становится особенно очевидной при наличии высокочастотного шумового фона или резких динамических изменений. Основная концепция *EEMD* заключается в многократном добавлении белого шума к исходному сигналу и последующем применении метода *EMD* к каждой из зашумленных реализаций. Полученные декомпозиции затем усредняются, что приводит к следующим эффектам:

- случайные шумовые флуктуации эффективно подавляются;
- устойчивые структуры сигнала усиливаются;
- извлеченные моды демонстрируют более четкое частотное разделение.

В результате *EEMD* зарекомендовала себя как наиболее надежный метод для анализа технических и биологических сигналов, особенно в условиях нестационарного фона и высокого уровня шумов.

Ансамблевая эмпирическая модовая декомпозиция с адаптивным шумом (*Complete Ensemble Empirical Mode Decomposition with Adaptive Noise (CEEMD)*) является развитой версией алгоритма *EEMD*, созданной для минимизации остаточных искажений, возникающих из-за наложения сгенерированных шумов. Его ключевое усовершенствование заключается в применении принципа адаптивного нормирования шумовых последовательностей и их последующей компенсации, что в совокупности гарантирует практически полную реконструкцию исходного сигнала без потерь. К числу значимых достоинств данной методики относятся:

- существенно более высокая точность реконструкции амплитудно-частотной структуры анализируемого сигнала;
- минимизация эффекта частотной интерференции (смещения) между соседними модами;
- улучшенная смысловая интерпретация получаемых *IMF*.

Метод *CEEMD* нашел активное применение в задачах предиктивной диагностики, таких как распознавание дефектов в подшипниковых узлах и идентификация аномальных режимов работы электромеханических систем, где точность разделения колебательных компонент является определяющим фактором.

Благодаря интерпретируемости извлекаемых компонент и адаптивному характеру декомпозиции, методы на основе *HTT* легко интегрируются в интеллектуальные системы. Полученные моды и их производные характеристики могут служить информативными входными данными для прогнозных моделей, классификаторов и систем поддержки принятия решений. Важной особенностью методологии *HTT* является то, что извлекаемые *IMFs* выходят за рамки простого представления частотно-временных характеристик сигнала. Их фундаментальная ценность заключается в диагностической интерпретируемости: каждая мода, выделенная методом *EMD*, содержит семантически значимую информацию, которая может быть напрямую соотнесена с конкретными физическими явлениями или техническими состояниями исследуемого объекта.

Эмпирические данные подтверждают, что различные моды несут различную смысловую нагрузку. В частности, начальные компоненты (*IMF1* и *IMF2*) преимущественно аккумулируют высокочастотные элементы сигнала. На практике эти составляющие часто являются индикаторами таких событий, как ударные механические воздействия, кратковременные импульсные нагрузки, резкие электрические помехи или другие резкие события, которые могут указывать на неисправность или раннее возникновение отказа. Их появление в структуре сигнала, таким образом, может служить ранним индикатором аномального режима работы. Пример гильбертова спектра, характерный для *IMF1* приведен на рис. 1.

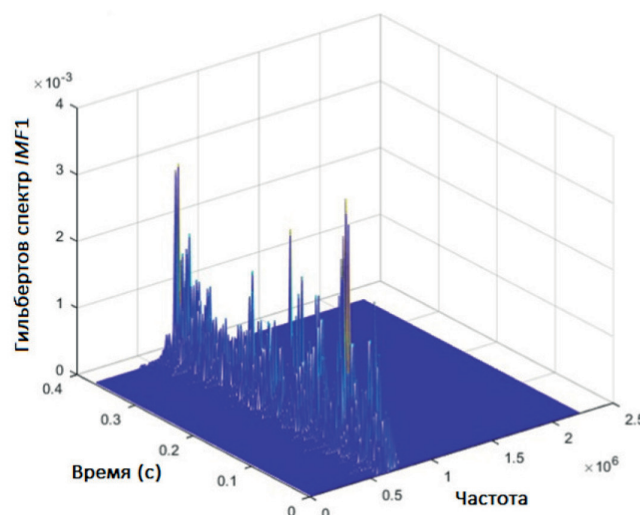


Рис. 1. Гильбертов спектр *IMF1*

Последующие моды ($IMF3$ – $IMF4$ – $IMF5$) отражают более стабильную динамику и, как правило, соответствуют регулярному колебательному поведению. В технических приложениях данные компоненты связаны с номинальными режимами работы механизмов, такими как циклическое движение, вращение или пульсация, и имеют критическое значение для построения эталонной модели нормального поведения системы.

Частотно-временное представление $IMF3$ – $IMF4$ – $IMF5$ в диапазоне 2600–5000 Гц приведено на рис. 2.

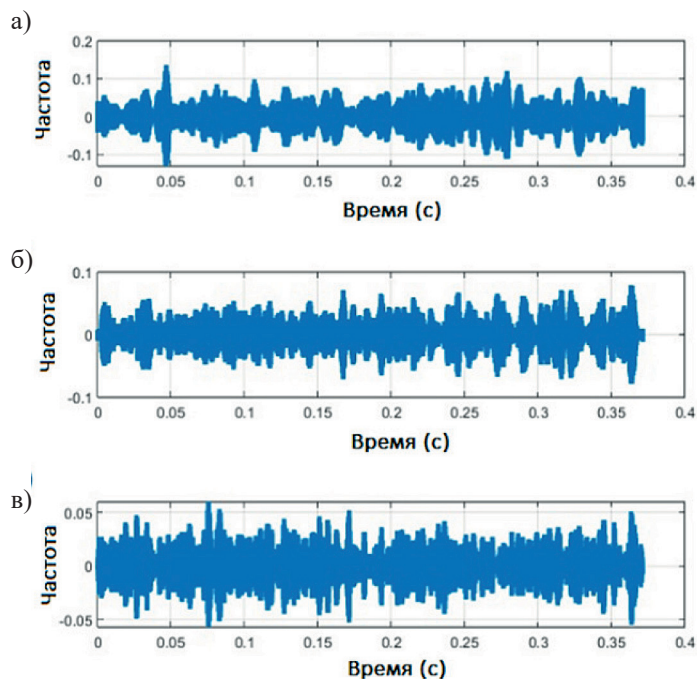


Рис. 2. Частотно-временное представление $IMF3$ – $IMF4$ – $IMF5$:
а — $IMF3$; б — $IMF4$; в — $IMF5$

Остаточный сигнал, формируемый на финальной итерации процедуры декомпозиции, обладает значимым диагностическим потенциалом. Данная низкочастотная составляющая, инкапсулирующая трендовую информацию, служит количественным отражением инерционных процессов. К их числу относятся кумулятивный износ узлов трения, прогрессирующая деградация структурных свойств материалов, систематическое снижение функциональной эффективности агрегата либо параметрический дрейф измерительных цепей. В контексте технической диагностики экспериментально установлено, что трансформации остаточного явления зачастую предшествуют моменту полного отказа, что квалифицирует данную компоненту в качестве предиктивного маркера для организации превентивных регламентных работ.

Сопоставительное исследование сигналов *до* и *после* возникновения аномалий демонстрирует не только вариации их временной формы, но и существенную реконфигурацию энергетического распределения в рамках модового ансамбля. При номинальном режиме работы доминирующая доля энергии локализована в центральных эмпирических модах. Возникновение аномалии приводит к выраженному энергетическому сдвигу в сторону экстремальных составляющих спектра: либо к высокочастотным, либо к низкочастотной компоненте. В зависимости от этого анализ на основе огибающей оценивает степень дефекта через влияние амплитуд, связанных с дефектом, в спектре огибающей на глубину модуляции. Во многих практических диагностических рекомендациях, если глубина модуляции выше приблизительно 10 %, то это может указывать на заметный дефект, тогда как значения около 20 % могут свидетельствовать о серьезном состоянии, требующем немедленного внимания. На практике допустимые пороги модуляции специфичны для оборудования и должны выбираться на основе базовых данных, режима работы и применимых стандартов или правил технического обслуживания.

Таким образом, на основании ранее изложенного можно выделить характерные важные свойства *IMF* и сделать следующие выводы.

1. Интерпретируемость *IMF*. Фундаментальное свойство метода эмпирической модовой декомпозиции заключается в способности генерировать иерархию *IMF*, каждая из которых обладает внутренней физической интерпретируемостью. Будучи адаптивными, квазигармоническими компонентами, *IMF* обеспечивают естественное разложение сигнала по характерным частотно-временным масштабам. Это позволяет установить детерминированную связь между отдельной модой и конкретным физическим процессом или источником колебаний в исследуемой системе, обеспечивая механистическую интерпретацию результатов декомпозиции.

2. Диагностический потенциал на основе количественных признаков. Диагностическая информативность *IMF* раскрывается в полной мере при переходе от качественного анализа к количественному. Путем вычисления таких дескрипторов, как мгновенные амплитуда и частота, а также статистических метрик (энтропия, асимметрия и др.), формируется многомерное пространство признаков. Данные векторы признаков, отражающие тонкие изменения в динамике мод, выступают в качестве высокоинформативных входных данных для современных алгоритмов машинного обучения и систем искусственного интеллекта, обеспечивая основу для построения точных и надежных моделей диагностики и прогнозирования.

3. Раннее предупреждение. Структурные изменения в *IMF* часто предшествуют визуально наблюдаемым аномалиям сигнала, что делает их эффективным инструментом для раннего предупреждения и предотвращения отказов.

Следует отметить, что визуализация *IMF* предоставляет экспертам удобный и интуитивно понятный инструмент для оценки состояния системы. Эта возможность поддерживает не только автоматизированную классификацию, но и ручной аудит обнаруженных аномалий, тем самым повышая общую надежность и достоверность диагностических выводов.

Интеграция НТТ с методами машинного обучения. Задача современных интеллектуальных систем мониторинга и диагностики эволюционировала от идентификации существующих дефектов к предсказанию критических состояний до их возникновения. Решающим инструментом для этого служат алгоритмы машинного обучения (МО), ориентированные на обнаружение скрытой семантики в массивах данных, инкрементальное обучение и формирование прогнозных моделей, устойчивых к воздействию помех, стохастической изменчивости и неполноты входных наблюдений [13–15].

Прогностическая состоятельность моделей, базирующихся на МО, детерминирована в первую очередь информационной емкостью и сепаративной способностью выделяемых признаков описаний. В рамках подходов, объединяемых общим понятием *методов искусственного интеллекта*, процесс классификации, как правило, формулируется как задача обучения с учителем, в которой устанавливается соответствие между признаками, т. е. характеристиками, извлеченными из набора данных, и метками классов. Следует отметить, что чрезмерное количество признаков зачастую приводит к переобучению модели, росту вычислительной сложности и снижению интерпретируемости итоговой модели. Следовательно, качество пространства признаков является критическим фактором в задачах виброспектрального анализа.

На этом этапе *НТТ* демонстрирует свою эффективность в качестве мощного инструмента предобработки данных, обеспечивая детальное частотно-временное представление сигнала. Благодаря адаптивной природе и способности выделять модовые компоненты *НТТ* позволяет эффективно структурировать даже сильно нерегулярные сигналы, облегчая тем самым последующее обучение моделей [16–18]. Более того, применение специализированных методов обработки данных, в частности интеграция автокодировщиков с *НТТ*, обеспечивает углубленное понимание и детальный анализ сложных сигналов, что позволяет идентифицировать значимые характеристики сигналов и выявлять даже незначительные изменения в их динамике. Данная методология является особенно эффективной при необходимости обнаружения минимальных отклонений в функционировании технических систем [19–22].

Результаты исследования (The Results of the Study)

Для проведения экспериментальных исследований был осуществлен эксплуатационный мониторинг поршневого компрессора типа СКА60/200 [23]. Регистрируемые параметры включали измерения давления и температуры от датчиков, установленных в зоне цилиндропоршневой группы, а также данные инкрементального датчика, смонтированного на валу электропривода. Экспериментальная выборка данных была сформирована на основе информации о 1000 агрегатах, четыре из которых представляли собой реальные компрессоры, испытанные на заводском стенде, а оставшиеся 996 образцов были получены путем математического моделирования на базе модели [24]. Структурная схема предлагаемого алгоритма прогнозирования технического состояния судового поршневого компрессора представлена на рис. 3.

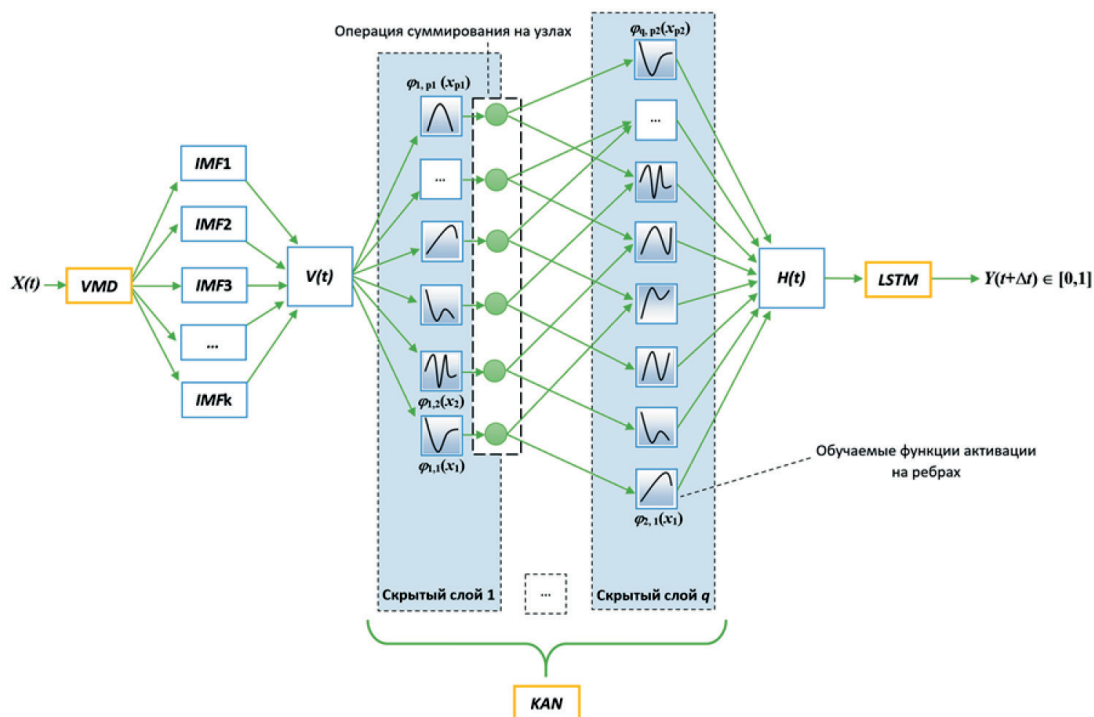


Рис. 3. Структурная схема прогнозирования технического состояния судового поршневого компрессора

Сформированный массив смоделированных данных был разделен по состоянию оборудования. Всего 700 агрегатов были отнесены к категории работающих в штатном режиме, включая один реальный компрессор, принятый за эталон, и 699 смоделированных. Оставшиеся 300 агрегатов характеризовались неисправным состоянием и включали три реальных компрессора и 297 смоделированных. Для реальных компрессоров, отнесенных к группе с неисправностями, были искусственно внесены характерные дефекты первой ступени: утечка воздуха через поршневые кольца, увеличенный объем вредного пространства и залипание нагнетательного клапана. Каждый тип дефекта был реализован на одном реальном компрессоре и воспроизведен на 99 смоделированных образцах.

Для оценки эффективности выявления характерных неисправностей было проведено сравнение следующих архитектур нейронных сетей: *LSTM*, глубокий автокодировщик (*DAE*), сеть Колмогорова – Арнольда (*KAN*), комбинированные подходы *VMD-LSTM*, *VMD-DAE*, а также предложенный метод *VMD-KAN-LSTM*. Полученные матрицы ошибок для сравниваемых архитектур представлены на рис. 4.

Экспериментальная постановка задачи соответствует классификации четырех классов: нормальная работа и три состояния характерных неисправностей. Верные прогнозы *TN* (*True Negative*) расположены на главной диагонали матрицы ошибок.

Для расчета метрик эффективности по каждому классу используется интерпретация «один против всех»:

- *TP* (*True Positive* — истинно-положительные) обозначает экземпляры целевого класса, корректно классифицированные как данный класс;
- *FP* (*False Positive* — ложноположительные) обозначает экземпляры других классов, ошибочно отнесенные к целевому классу;
- *FN* (*False Negative* — ложноотрицательные) обозначает экземпляры целевого класса, ошибочно классифицированные как другие классы.

а)

Факт \ Прогноз	Исправен	Неиспр. 1	Неиспр. 2	Неиспр. 3
Исправен	TN: 650	FP: 25	FP: 15	FP: 10
Неиспр. 1	FN: 15	TP: 75	FN: 6	FN: 4
Неиспр. 2	FN: 12	FP: 5	TP: 78	FN: 5
Неиспр. 3	FN: 10	FP: 4	FP: 5	TP: 81

б)

Факт \ Прогноз	Исправен	Неиспр. 1	Неиспр. 2	Неиспр. 3
Исправен	TN: 660	FP: 20	FP: 12	FP: 8
Неиспр. 1	FN: 10	TP: 80	FN: 5	FN: 5
Неиспр. 2	FN: 8	FP: 6	TP: 82	FN: 4
Неиспр. 3	FN: 7	FP: 5	FP: 4	TP: 84

в)

Факт \ Прогноз	Исправен	Неиспр. 1	Неиспр. 2	Неиспр. 3
Исправен	TN: 640	FP: 30	FP: 18	FP: 12
Неиспр. 1	FN: 18	TP: 72	FN: 6	FN: 4
Неиспр. 2	FN: 15	FP: 7	TP: 73	FN: 5
Неиспр. 3	FN: 14	FP: 5	FP: 6	TP: 75

г)

Факт \ Прогноз	Исправен	Неиспр. 1	Неиспр. 2	Неиспр. 3
Исправен	TN: 680	FP: 10	FP: 6	FP: 4
Неиспр. 1	FN: 5	TP: 72	FN: 4	FN: 3
Неиспр. 2	FN: 4	FP: 3	TP: 73	FN: 3
Неиспр. 3	FN: 3	FP: 3	FP: 3	TP: 75

д)

Факт \ Прогноз	Исправен	Неиспр. 1	Неиспр. 2	Неиспр. 3
Исправен	TN: 685	FP: 8	FP: 4	FP: 3
Неиспр. 1	FN: 4	TP: 90	FN: 3	FN: 3
Неиспр. 2	FN: 3	FP: 3	TP: 92	FN: 2
Неиспр. 3	FN: 2	FP: 3	FP: 2	TP: 93

е)

Факт \ Прогноз	Исправен	Неиспр. 1	Неиспр. 2	Неиспр. 3
Исправен	TN: 695	FP: 3	FP: 1	FP: 1
Неиспр. 1	FN: 2	TP: 95	FN: 2	FN: 1
Неиспр. 2	FN: 1	FP: 1	TP: 97	FN: 1
Неиспр. 3	FN: 1	FP: 1	FP: 1	TP: 97

Рис. 4. Матрица классификации ошибок: а — *LSTM*; б — *DAE*; в — *KAN*; г — *VMD + LSTM*; д — *VMD + DAE*; е — *VMD + KAN + LSTM*

На основе этих значений дополнительно могут быть рассчитаны точность (2) и полнота (3):

$$PR = \frac{TP}{TP + FP}; \quad (2)$$

$$REC = \frac{TP}{TP + FN}, \quad (3)$$

а также усредненные по всем классам показатели.

Результаты эксперимента, представленные на рис. 4, демонстрируют превосходство гибридных алгоритмов с предварительной обработкой на основе *VMD*, и, в частности, метода *VMD-KAN-LSTM*, над другими рассмотренными моделями нейросетевых архитектур машинного обучения и их парными комбинациями по ключевым показателям.

Обсуждение (Discussion)

Проведенное исследование демонстрирует, что модовая декомпозиция предоставляет практический способ перехода от исходных виброакустических сигналов к интерпретируемым признакам для последующей оценки состояния системы. При разложении нестационарного сигнала на адаптивные составляющие, полученный набор мод может быть исследован как совокупность отдельных вкладов лежащих в его основе динамических процессов. В представленных экспериментах компоненты с максимальной производительностью были ассоциированы

с кратковременной высокочастотной активностью, сопровождающей возникновение возмущений; средние моды отражали регулярную рабочую динамику, подходящую для определения номинального эталона; а медленно меняющийся остаток соответствовал долгосрочным тенденциям, согласующимся с постепенным дрейфом параметров.

В ходе экспериментов, описанных в работе, было установлено, что наиболее быстро изменяющиеся компоненты сигнала коррелируют с кратковременными высокочастотными возмущениями, возникающими в системе. Промежуточные режимы, в свою очередь, отражают типичную динамику функционирования, что позволяет определить номинальные параметры системы. Медленно изменяющийся остаток сигнала характеризует долгосрочные тенденции, связанные с постепенным изменением параметров системы. Такое модовое представление дополняет диагностику по огибающей, где тяжесть дефекта оценивается по глубине модуляции в спектре огибающей, а пороговые уровни выбираются применительно к конкретному типу оборудования.

Следует отметить фундаментальную значимость информативности входных данных, которые позволяют обеспечить высокую эффективность алгоритмов машинного обучения. В рамках данного подхода преобразование Гильберта – Хуанга (*ННТ*) показано как эффективный инструмент предобработки, структурирующий сложные сигналы в частотно-временной области. Комбинация *ННТ* с методами, основанными на автоэнкодерах, представляет собой перспективный подход для повышения чувствительности к слабо выраженным изменениям в данных.

Проведенное сравнительное исследование различных нейронных архитектур подтверждает значимость гибридных систем, включающих предварительную обработку на основе вариационного разложения мод (*VMD*). Сравнительная оценка, выполненная для нескольких нейросетевых архитектур, показала, что среди рассмотренных вариантов подход *VMD-KAN-LSTM* демонстрирует наивысшие показатели в задачах классификации, что свидетельствует о его высокой эффективности и адаптивности к сложным условиям анализа данных.

Представленные результаты экспериментальной апробации наглядно подтверждают эти теоретические положения. На примере судового поршневого компрессора продемонстрировано, что методы, основанные на нелинейной динамике, хорошо подходят для анализа сложных технических систем. Преобразование Гильберта – Хуанга и его модификации позволяют получать компактные представления нелинейных и нестационарных временных рядов, которые могут применяться для распознавания, кластеризации, обнаружения изменений и интеграции с моделями машинного обучения. Предложенный подход представляется особенно актуальным для диагностики дефектов на ранней стадии, когда их признаки могут быть слабо выражены.

Выводы (Summary)

На основе проведенного исследования можно сделать следующие выводы:

1. Применение современных достижений теории нелинейной динамики для математического моделирования сложных технических систем является новым и перспективным направлением междисциплинарных исследований. Накапливается опыт интерпретации полученных результатов, в том числе в различных задачах технического диагностирования. Накапливается опыт интерпретации полученных результатов, в том числе в различных задачах технического диагностирования.

2. *ННТ* и его модификации, будучи ориентированными в первую очередь на анализ нестационарных и нелинейных процессов, позволяют формировать сжатые представления временных рядов со сложной структурой, которые эффективно используются в метрических моделях распознавания, в моделях кластеризации и обнаружения разладки; в комплексе с разными вариантами моделей машинного обучения.

3. Исследование подтверждает общую гипотезу о том, что инструменты, базирующиеся на принципах нелинейной динамики, демонстрируют высокую эффективность при анализе сложных технических систем. В частности, предоставляют возможность создания компактных репрезентаций нелинейных и нестационарных временных рядов, что открывает широкие перспективы

для задач распознавания, кластеризации, детектирования изменений и интеграции с алгоритмами машинного обучения.

4. В работе предложен нетрадиционный подход к анализу виброакустических данных на основе косвенных эффектов нелинейности, позволяющий получать диагностическую информацию для маломощных источников вибрации, что характерно для зарождающихся и слабо выраженных дефектов.

5. Значимость многомерных обобщений позволяет осуществлять синхронную многоканальную обработку данных, сохраняя при этом временные и фазовые соотношения. Многомерные обобщения демонстрируют свою применимость к компактным представлениям данных, аналогичных изображениям, что открывает новые возможности для анализа и интерпретации сложных технических систем.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Randall R. B.* Vibration-based condition monitoring: industrial, automotive and aerospace applications. — John Wiley & Sons, 2021. DOI: 10.1002/9781119477631.
2. *G. M. H. Mohd* Vibration Analysis for Machine Monitoring and Diagnosis: A Systematic Review / M. Ghazali, H. Mohd, W. Rahiman // Shock and Vibration. — 2021. — Vol. 2021. — Is. 1. — Pp. 9469318. DOI: 10.1155/2021/9469318.
3. *Antoni J.* A Critical Overview of the “Filterbank-Feature-Decision” Methodology in Machine Condition Monitoring / J. Antoni // Acoustics Australia. — 2021. — Vol. 49. — Is. 2. — Pp. 177–184.
4. Makarikhin P. Clustering of localized acoustic emission sources by the DBSCAN algorithm in separators / P. Makarikhin, A. Grigorieva, M. Maksimenko // Proc. Eng. Sci. — 2023. — Vol. 5. — Is. 3. — C. 495–502. DOI: 10.24874/PES05.03.013.
5. *Huang N. E.* The empirical mode decomposition and the Hilbert spectrum for nonlinear and non-stationary time series analysis / N. E. Huang, Z. Shen, S. R. Long, M. C. Wu, H. H. Shih, Q. Zheng, N-C. Yen, C. C. Tung, H. H. Liu // Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences. — 1998. — Vol. 454. — Is. 1971. — Pp. 903–995. DOI: 10.1098/rspa.1998.0193.
6. Кан Ш. Ч. Анализ нестационарных сигналов на основе преобразования Гильберта — Хуанга / Ш. Ч. Кан, А. В. Микулович, В. И. Микулович // Информатика. — 2010. — Т. 2(26). — С. 25–35.
7. Barboosh M. Empirical mode decomposition and its variants: a review with applications in structural health monitoring / M. Barboosh, P. Singh, A. Sadhu // Smart Materials and Structures. — 2020. — Vol. 29. — Is. 9. — Pp. 093001. DOI: 10.1088/1361-665X/aba539.
8. *Тындыкарь Л. Н.* Обнаружение неисправностей судовых технических средств на основе новых методов интеллектуального анализа данных / Л. Н. Тындыкарь // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2025. — Т. 17. — № 6. — С. 965–979. DOI: 10.21821/2309-5180-2025-17-6-965-979. — EDN TYDNIA.
9. *Cao Z.* Change Point Detection in Multi-Channel Time Series via a Time-Invariant Representation / Z. Cao, N. Seeuws, M. De Vos, A. Bertrand // IEEE Transactions on Knowledge and Data Engineering. — 2024. — Vol. 36. — Is. 12. — Pp. 7743–7756. DOI: 10.1109/TKDE.2023.3347356.
10. *Yang Z.* A communication-efficient, online changepoint detection method for monitoring distributed sensor networks / Z. Yang, I. A. Eckley, P. Fearnhead // Statistics and Computing. — 2024. — Vol. 34. — Is. 3. — Pp. 115.
11. Musaev A. Proactive Algorithms for Stabilizing the State of Technological Processes Based on Metric Machine Learning Algorithms / A. Musaev, A. Makshanov, D. Grigoriev // 2024 International Russian Automation Conference (RusAutoCon) — 2024. — Pp. 531–536. DOI: 10.1109/RusAutoCon61949.2024.10694156.
12. *Makshanov A.* Analyzing and forecasting financial series with singular spectral analysis / A. Makshanov, A. Musaev, D. Grigoriev // Dependence Modeling. — 2022. — Vol. 10. — Is. 1. — Pp. 215–224. DOI: 10.1515/demo-2022-0112.
13. *Pang G.* Deep Learning for Anomaly Detection: A Review / G. Pang, C. Shen, L. Cao, A. V. D. Hengel // ACM Comput. Surv. — 2021. — Vol. 54. — Is. 2. DOI: 10.1145/3439950.
14. *Matania O.* Signal Processing for the Condition-Based Maintenance of Rotating Machines via Vibration Analysis: A Tutorial / O. Matania, L. Bachar, E. Bechhoefer, J. Bortman // Sensors. — 2024. — Vol. 24. — Is. 2. DOI: 10.3390/s24020454.

15. Лиманский Н. Н. Модель обнаружения аномалий на основе обучения без учителя для многомерных временных рядов технологических параметров промышленных объектов / Н. Н. Лиманский // Вестник государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2025. — Т. 17. — № 5. — С. 768–778. DOI: 10.21821/2309-5180-2025-17-5-768-778. — EDN WDIPTC.
16. Хотский Р. Р. Диагностика неисправностей судовых поршневых компрессоров с использованием преобразования Гильберта-Хуанга / Р. Р. Хотский, А. В. Макшанов, А. В. Бураков, Л. Н. Тындыкарь // Морской вестник. — 2025. — № 1(93). — С. 71–75. — EDN JVLHQR.
17. Хотский Р. Р. Прогнозирование технического состояния поршневого компрессора на основе вариационной модовой декомпозиции и рекуррентной нейронной сети / Р. Р. Хотский, А. В. Бураков, А. В. Макшанов, Л. Н. Тындыкарь // Морской вестник. — 2025. — № 2(94). — С. 45–49. — EDN XDDJRI.
18. Хотский Р. Р. Анализ технического состояния судового поршневого компрессора на основе вариационной модовой декомпозиции и глубокого автоэнкодера / Р. Р. Хотский, Л. Г. Кузнецов, А. В. Бураков [и др.] // Морской вестник. — 2025. — № 3(95). — С. 63–69. — EDN XQRMOC.
19. Bie F. Research on fault diagnosis method of reciprocating compressor valve based on IVMD-CMS model / F. Bie, S. Chen, F. Lyu, H. Zhu, Q. Li, X. Miao // Journal of Mechanical Science and Technology. — 2023. — Vol. 37. — Is. 8. — Pp. 3931–3943.
20. Guo F.-Y. Fault Diagnosis of Reciprocating Compressor Valve Based on Transfer Learning Convolutional Neural Network / F.-Y. Guo, Y.-C. Zhang, Y. Wang, P.-J. Ren, P. Wang // Mathematical Problems in Engineering. — 2021. — Vol. 2021. — Is. 1. — Pp. 8891424. DOI: 10.1155/2021/8891424.
21. Zhang Z. Distinguish between Stochastic and Chaotic Signals by a Local Structure-Based Entropy / Z. Zhang, J. Wu, Y. Chen, J. Wang, J. Xu // Entropy. — 2022. — Vol. 24. — Is. 12. DOI: 10.3390/e24121752.
22. Balagurin P. S. Predicting changes in the state of an industrial facility using machine learning methods / P. S. Balagurin, A. V. Grigorieva, M. Kulagin // AIP Conference Proceedings. — 2021. — Vol. 2402. — Is. 1. — Pp. 040031. DOI: 10.1063/5.0071408.
23. Бураков А. В. Выбор и изучение способов реализации модели диагностирования компрессорных станций ракетно-космического комплекса / А. В. Бураков, Р. Р. Хотский, Л. Г. Кузнецов // Омский научный вестник. Серия Авиационно-ракетное и энергетическое машиностроение. — 2025. — Т. 9. — № 1. — С. 72–82. DOI: 10.25206/2588-0373-2025-9-1-72-82. — EDN JRHMT0.
24. Хотский Р. Р. Разработка математической модели технического диагностирования поршневых компрессоров ракетно-космического комплекса / Р. Р. Хотский, А. В. Бураков, Л. Г. Кузнецов // Омский научный вестник. Серия Авиационно-ракетное и энергетическое машиностроение. — 2025. — Т. 9. — № 3. — С. 38–46. DOI: 10.25206/2588-0373-2025-9-3-38-46. — EDN EVJMLE.

REFERENCES

1. Randall R. B. *Vibration-based condition monitoring: industrial, automotive and aerospace applications*. John Wiley & Sons, 2021. DOI: 10.1002/9781119477631.
2. Ghazali, M. H. Mohd and W. Rahiman. “Vibration Analysis for Machine Monitoring and Diagnosis: A Systematic Review.” *Shock and Vibration* 2021.1 (2021): 9469318. DOI: 10.1155/2021/9469318.
3. Antoni, J. “A Critical Overview of the “Filterbank-Feature-Decision” Methodology in Machine Condition Monitoring.” *Acoustics Australia* 49.2 (2021): 177–184.
4. Makarikhin, P., A. Grigorieva and M. Maksimenko. “Clustering of localized acoustic emission sources by the DBSCAN algorithm in separators.” *Proc. Eng. Sci.* 5.3 (2023): 495–502. DOI: 10.24874/PES05.03.013.
5. Huang, N. E., Z. Shen et al. “The empirical mode decomposition and the Hilbert spectrum for nonlinear and non-stationary time series analysis.” *Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences* 454.1971 (1998): 903–995. DOI: 10.1098/rspa.1998.0193.
6. Kan, Sh. Ch., A. V. Mikulovich and V. I. Mikulovich. “Analiz nestatsionarnykh signalov na osnove preobrazovaniya Gil’berta — KHuanga.” *Informatics* 2(26) (2010): 25–35.
7. Barbosh, M., P. Singh and A. Sadhu. “Empirical mode decomposition and its variants: a review with applications in structural health monitoring.” *Smart Materials and Structures* 29.9 (2020): 093001. DOI: 10.1088/1361-665X/aba539.
8. Tyndykar, L. N. “Shipboard equipment malfunctions detection based on new data mining methods.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 17.6 (2025): 965–979. DOI: 10.21821/2309-5180-2025-17-6-965-979.

9. Cao, Z., N. Seeuws, M. De Vos and A. Bertrand. "Change Point Detection in Multi-Channel Time Series via a Time-Invariant Representation." *IEEE Transactions on Knowledge and Data Engineering* 36.12 (2024): 7743–7756. DOI: 10.1109/TKDE.2023.3347356.
10. Yang, Z., I. A. Eckley and P. Fearnhead. "A communication-efficient, online changepoint detection method for monitoring distributed sensor networks." *Statistics and Computing* 34.3 (2024): 115.
11. Musaev, A., A. Makshanov and D. Grigoriev. "Proactive Algorithms for Stabilizing the State of Technological Processes Based on Metric Machine Learning Algorithms." *2024 International Russian Automation Conference (RusAutoCon)* — 2024: 531–536. DOI: 10.1109/RusAutoCon61949.2024.10694156.
12. Makshanov, A., A. Musaev and D. Grigoriev. "Analyzing and forecasting financial series with singular spectral analysis." *Dependence Modeling* 10.1 (2022): 215–224. DOI: doi:10.1515/demo-2022-0112.
13. Pang, G., C. Shen, L. Cao and A. V. D. Hengel. "Deep Learning for Anomaly Detection: A Review." *ACM Comput. Surv.* 54.2 (2021). DOI: 10.1145/3439950.
14. Matania, O., L. Bachar, E. Bechhoefer and J. Bortman. "Signal Processing for the Condition-Based Maintenance of Rotating Machines via Vibration Analysis: A Tutorial." *Sensors* 24.2 (2024). DOI: 10.3390/s24020454.
15. Limanskiy, N. N. "Anomaly detection model based on unsupervised learning for multivariate industrial time series." *Vestnik gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 17.5 (2025): 768–778. DOI: 10.21821/2309-5180-2025-17-5-768-778.
16. Khotskiy, R. R., A. V. Makshanov, A. V. Burakov and L. N. Tyndykar'. "Diagnostika neispravnostey sudovykh porshnevnykh kompressorov s ispol'zovaniem preobrazovaniya Gil'berta-Khuanga." *Morskoy Vestnik* 1(93) (2025): 71–75.
17. Khotskiy, R. R., A. V. Burakov, A. V. Makshanov and L. N. Tyndykar'. "Prognozirovanie tekhnicheskogo sostoyaniya porshnevnogo kompressora na osnove variatsionnoy modovoy dekompozitsii i rekurrentnoy neyronnoy seti." *Morskoy Vestnik* 2(94) (2025): 45–49.
18. Khotskiy, R. R., L. G. Kuznetsov, A. V. Burakov et al. "Analiz tekhnicheskogo sostoyaniya sudovogo porshnevnogo kompressora na osnove variatsionnoy modovoy dekompozitsii i glubokogo avtoenkodera." *Morskoy Vestnik* 3(95) (2025): 63–69.
19. Bie, F., X. Miao et al. "Research on fault diagnosis method of reciprocating compressor valve based on IVMD-CMS model." *Journal of Mechanical Science and Technology* 37.8 (2023): 3931–3943.
20. Guo, F.-Y., P. Wang et al. "Fault Diagnosis of Reciprocating Compressor Valve Based on Transfer Learning Convolutional Neural Network." *Mathematical Problems in Engineering* 2021.1 (2021): 8891424. DOI: 10.1155/2021/8891424.
21. Zhang, Z., J. Xu et al. "Distinguish between Stochastic and Chaotic Signals by a Local Structure-Based Entropy." *Entropy* 24.12 (2022). DOI: 10.3390/e24121752.
22. Balagurin, P. S., A. V. Grigorieva and M. Kulagin. "Predicting changes in the state of an industrial facility using machine learning methods." *AIP Conference Proceedings* 2402.1 (2021): 040031. DOI: 10.1063/5.0071408.
23. Burakov, A. V., R. R. Khotskiy and L. G. Kuznetsov. "Selection and study of methods for implementing a diagnostic model for compressor stations of the rocket and space complex." *Omsk Scientific Bulletin. Series Aviation-Rocket and Power Engineering* 9.1 (2025): 72–82. DOI: 10.25206/2588-0373-2025-9-1-72-82.
24. Khotskiy, R. R., A. V. Burakov and L. G. Kuznetsov. "Development of a mathematical model for technical diagnostics of reciprocating compressors for the rocket and space complex." *Omsk Scientific Bulletin. Series Aviation-Rocket and Power Engineering* 9.3 (2025): 38–46. DOI: 10.25206/2588-0373-2025-9-3-38-46.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Тындыкарь Любовь Николаевна — соискатель
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала
С. О. Макарова»
198035, Российская Федерация, Санкт-Петербург,
ул. Двинская, 5/7
e-mail: tyndykar@bk.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Tyndykar, Ljubov N. — applicant
Admiral Makarov State University of Maritime
and Inland Shipping
5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg 198035,
Russian Federation
e-mail: tyndykar@bk.ru

Статья поступила в редакцию: 02 декабря 2025 г.
Received: Dec. 2, 2025

INTELLIGENT SUPPORT FOR MONITORING TRANSPORT AND LOGISTICS SERVICES IN INTEGRATED SUPPLY CHAINS BASED ON RISK MANAGEMENT

Y. M. Iskanderov¹, A. A. Butsanets², V. P. Sharkova²

¹St. Petersburg Federal Research Center of the Russian Academy of Sciences,
Saint Petersburg, Russia

²Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping,
Saint Petersburg, Russia

This study develops an approach to intelligent support for monitoring transport and logistics services in integrated supply chains based on risk management. The relevance of the work is determined by the growing uncertainty and risk burden in transport and logistics processes, geopolitical instability, transformation of logistics routes, and increased competition between transport modes. Special attention is given to water transport, which is highly dependent on natural, infrastructural, organizational, and technological factors, increasing the likelihood of cascading effects within supply chains. The aim of the research is to form a concept for integrated risk monitoring of transport and logistics services and to develop an intelligent decision support system to ensure sustainable and safe functioning of integrated supply chains. The object of the research is transport and logistics services as part of integrated supply chains, while the subject is the methods and tools for monitoring and assessing risks arising during their implementation. The methodological basis includes risk management, system analysis, expert assessments, and methods for forming and analyzing management decision alternatives. The study describes procedures for obtaining relevant risk information, presents the structure of the intelligent support system, details the content of its semantic core, and explains the algorithm for selecting optimal management solutions. The results substantiate the expediency of using intelligent systems for monitoring risks in transport and logistics services, highlight the role of critical points in water transport for ensuring supply chain resilience, and emphasize the importance of data visualization in improving decision efficiency and validity. The proposed approach is applicable to various classes of transport and logistics services, including water transport, whose facilities may be considered critical points of integrated supply chains with increased risk exposure.

Keywords: intelligent support system, monitoring, transport and logistics services, integrated supply chains, risk management, decision support, alternatives, critical points, data visualization.

For citation:

Iskanderov, Yuri M., A. A. Butsanets and V. P. Sharkova. "Intelligent support for monitoring transport and logistics services in integrated supply chains based on risk management." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 18.1 (2026): 152–163. DOI: 10.21821/2309-5180-2026-18-1-152-163.

УДК 004.89: 656.078

ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНАЯ ПОДДЕРЖКА МОНИТОРИНГА ТРАНСПОРТНО-ЛОГИСТИЧЕСКИХ УСЛУГ В ИНТЕГРИРОВАННЫХ ЦЕПЯХ ПОСТАВОК НА ОСНОВЕ РИСК-МЕНЕДЖМЕНТА

Ю. М. Искандеров¹, А. А. Буцанец², В. П. Шаркова²

¹Санкт-Петербургский Федеральный исследовательский центр РАН,
Санкт-Петербург, Россия

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

Статья посвящена разработке подхода к интеллектуальной поддержке мониторинга транспортно-логистических услуг в интегрированных цепях поставок на основе риск-менеджмента. Актуальность исследования обусловлена ростом неопределенности и риска нагруженности транспортно-логистических процессов, геополитической нестабильности, трансформации логистических маршрутов и необходимости

организации мультимодальных перевозок. Особое внимание уделяется водному транспорту, для которого характерна высокая зависимость от природных, инфраструктурных и организационно-технологических факторов, что усиливает вероятность возникновения каскадных эффектов в цепях поставок. Целью исследования является формирование концепции комплексного мониторинга рисков транспортно-логистических услуг и разработка системы интеллектуальной поддержки принятия решений для обеспечения устойчивого и безопасного функционирования интегрированных цепей поставок. Объектом исследования являются транспортно-логистические услуги в составе интегрированных цепей поставок, предметом исследования — методы и инструменты мониторинга и оценки рисков, возникающих в процессе их реализации. Методологическую основу исследования составляют методы риск-менеджмента, системного анализа, экспертных оценок, а также методы формирования и анализа альтернатив управленческих решений. В статье описаны способы получения релевантной информации о рисках, представлена структура системы интеллектуальной поддержки, раскрыто содержание ее семантического ядра и приведен алгоритм функционирования при выборе оптимальных управленческих решений. В результате исследования обоснована целесообразность использования интеллектуальных систем для мониторинга рисков транспортно-логистических услуг, показана роль критических точек водного транспорта в обеспечении устойчивости цепей поставок и подчеркнута значимость визуализации данных для повышения оперативности и обоснованности управленческих решений. Предложенный подход к интеллектуальной поддержке мониторинга транспортно-логистических услуг применим к различным классам транспортно-логистических услуг, включая водный транспорт, объекты которого могут рассматриваться как критические точки интегрированных цепей поставок с повышенной риск-нагруженностью.

Ключевые слова: система интеллектуальной поддержки; мониторинг; транспортно-логистические услуги; интегрированные цепи поставок; риск-менеджмент; альтернатива; решение; риск-менеджер, критические точки; визуализация данных.

Для цитирования:

Искандеров Ю. М. Интеллектуальная поддержка мониторинга транспортно-логистических услуг в интегрированных цепях поставок на основе риск-менеджмента / Ю. М. Искандеров, А. А. Буцанец, В. П. Шаркова // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2026. — Т. 18. — № 1. — С. 152–163. DOI: 10.21821/2309-5180-2026-18-1-152-163. — EDN ZYENDY.

Введение (Introduction)

Предоставление транспортно-логистических услуг (ТЛУ) — одна из сфер деятельности, сопряженных с широкой номенклатурой рисков, имеющих различную природу и формы проявлений. Особенным образом влияние рисков проявляется в сфере морского транспорта, поскольку рынок глобальных морских перевозок по-прежнему развивается в условиях высокой волатильности ввиду постоянно изменяющейся геополитической обстановки и нестабильности крупнейших экономик мира. Создавшаяся ситуация приводит к продолжающейся трансформации логистических цепочек: многие участники рынка перестраивают свои процессы, чтобы обойти возникшие «узкие» места и зоны риска, что приводит, в свою очередь, к задержкам в поставках и дополнительным издержкам. Глобальные морские грузоперевозки показали замедление роста до 0,5 % и снижение спроса на фоне роста в первой половине года, спровоцированного в основном геополитическими событиями, изменениями в нормативно-правовой базе, а также технико-технологическими факторами [1–3].

В более широком контексте указанные факторы определяют рисковую специфику водного транспорта в целом, как морского, так и внутреннего водного. Несмотря на различия в масштабах и условиях функционирования данные подсистемы характеризуются сходной логикой формирования рисков, вызванной зависимостью процесса перевозки от состояния водной среды и инфраструктурных ограничений, что позволяет рассматривать водный транспорт как самостоятельный класс ТЛУ в системе мониторинга интегрированных цепей поставок.

Ситуацию риска обостряет и усиливает конкуренция в перевозках как между видами транспорта, так и внутри них. Все это определяет усложнение условий для ведения бизнеса в сфере ТЛУ и характеризует ее как одну из наиболее рискованных сфер деятельности. Поэтому создание эффективных систем мониторинга и контроля и предотвращения рисков является необходимым условием для решения экономических и технико-технологических проблем в интегрированных цепях поставок (ИЦП), а также обеспечения их жизнеспособности.

Все участники транспортно-логистического процесса: персонал, владелец транспортных средств, грузовладелец и другие заинтересованные стороны, образуют своеобразную *цепочку рисков*. Неспособность выявления, контроля и предотвращения выявления рисков в каком-либо одном звене этой цепи может привести к инциденту в любом другом звене. Поэтому каждый участник — от конкретного специалиста до руководителя транспортно-логистической компании — должен выполнять программу риск-менеджмента в зоне своей ответственности и в рамках своих функций и полномочий.

Методы и материалы (Methods and Materials)

Актуальным является вопрос формирования новой концепции комплексного (интегрированного) мониторинга рисками, которая должна опираться на научный подход к риску и риск-исследованиям [1–3]. Риск-менеджмент может служить основой методологии мониторинга жизнеспособности ТЛУ, дающей лицам, принимающим управленческие решения, возможность своевременно определить управляющие воздействия по улучшению организации процессов в ИЦП, опирающиеся на отношение фактических и нормативных временных затрат в процессе выполнения различных операций в виде меры обеспеченности ТЛУ (рис. 1). Особое значение это имеет при наличии различного рода форс-мажорных обстоятельств.

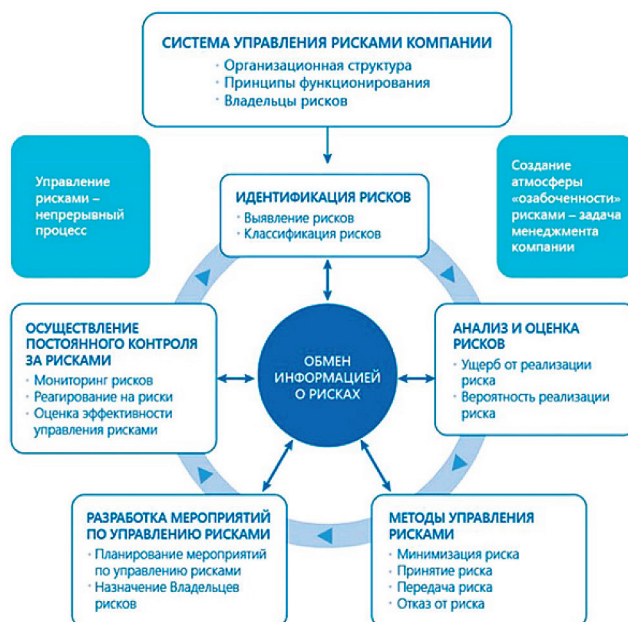


Рис. 1. Общая структура системы управления рисками транспортно-логистических услуг в интегрированных цепях поставок [3]

Реализация указанных воздействий обеспечит повышение качества ТЛУ и снижение затрат на перевозку грузов, существенное увеличение пропускной и провозной способности, что в конечном итоге повысит конкурентоспособность ИЦП.

Важными условиями определения различного рода рисков являются *качество* и *надежность* информационных ресурсов. Представленные в работе методы получения и анализа информации применимы к различным классам ТЛУ (например, к водному транспорту), для которого особое значение имеют данные о навигационных условиях и характеристиках портовой инфраструктуры. Источниками получения сведений о характеристиках отдельных рисков могут быть любые источники: официальные и неофициальные, постоянные и разовые, а также достоверные, требующие проверки. Определение и выбор соответствующих источников сведений играет существенную роль в риск-менеджменте, поскольку информация, используемая для анализа и оценки риска, должна удовлетворять требованиям достоверности, полноты, своевременности и однозначной интерпретируемости [4–8]. Поэтому выбор источников знаний осуществляет специальная

группа экспертов — риск-менеджеров, которая следует заданным целям с учетом решаемых задач. Для каждой задачи определяется свой набор источников сведений.

Условия выбора источников информации и попадания в соответствующий набор задаются следующими характеристиками: [7]:

- максимальный уровень доверия;
- обладание релевантной предметной области ТЛУ информацией;
- наличие непосредственного доступа для риск-менеджера;
- наличие возможности извлечения сведений из источника.

Существуют различные методы формирования наборов источников информации и различные способы работы с ними [4, 7], однако в условиях форс-мажорных обстоятельств, стрессового характера ситуаций, дефицита времени принятия решений зачастую используются методы, которые не требуют для реализации большого количества ресурсов. Одним из таких наиболее распространенных методов, используемых в практической деятельности, является *метод составления списка источников* [7]. Содержанием его является формирование списков источников сведений, которое выполняется группой экспертов — риск-менеджеров в предметной области ТЛУ с использованием собственной шкалы предпочтений. Этот метод применяется для источников любого типа (одушевленных и неодушевленных) и является наиболее простым и универсальным, однако не имеет четкой алгоритмической структуры с точки зрения организационно-технологической реализации.

С учетом требований, обусловленных форс-мажорными обстоятельствами, указанный список источников необходимо формировать в сжатые сроки, он должен быть максимально релевантным для оперативного решения задач управления ИЦП. На рис. 2 представлена разработанная модельная структура алгоритма указанного метода.

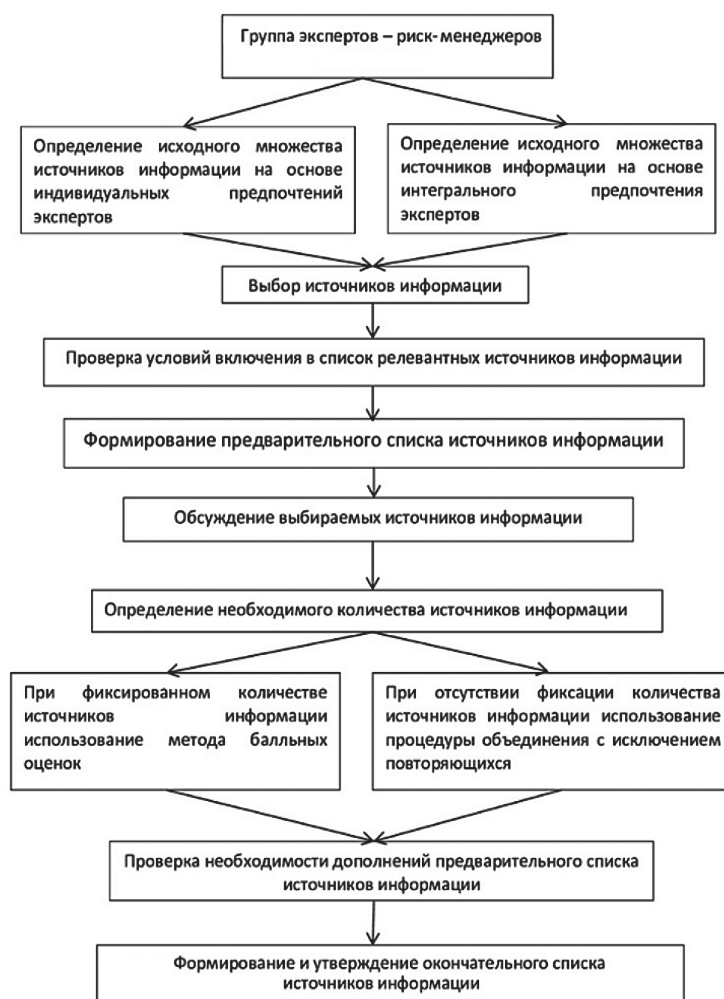


Рис. 2. Модельная структура алгоритма метода составления списка источников

Эксперты, на основе знаний и опыта, коллективно определяют список источников и обсуждают его состав. Выявленные при обсуждении необходимые дополнения включаются в полученный список. Формирование списка завершается при отсутствии дополнений. Если список источников формировался каждым экспертом индивидуально, то необходимо применить процедуру формирования обобщенного списка. Например, если количество источников не было фиксированным, то отдельные списки подлежат объединению с исключением повторяющихся в источниках сведений. В случае, когда количество источников заранее зафиксировано, необходимо применить метод балльных оценок, чтобы включить в список источники с максимальным количеством баллов.

Выбрав необходимое количество релевантных источников сведений для анализа и оценки рисков в ИЦП, риск-менеджер определяет совокупность методов взаимодействия с ними. Как правило, основными методами являются [4]:

1. *Сбор и анализ опросных листов*, представляющих перечень вопросов, позволяющих оперативно составить всестороннее представление о структуре и количественных показателях ТЛУ в ИЦП (рис. 3).

1. Контактные данные для уточнения технических вопросов

Наименование организации: Город: ИНН: ФИО сотрудника для взаимодействия:

Контактный номер телефона: Адрес эл. почты:

2. Общая информация об объемах услуг

2.1. Информация о видах услуг

Консолидация грузов Да Нет Контейнерные перевозки Да Нет Мультимодальные перевозки Да Нет

Ж/Д перевозки Да Нет Автомобильные перевозки Да Нет Авиационные перевозки Да Нет

Морские перевозки Да Нет

2.2. Количество первичной информации

Среднемесячное количество электронных транспортных накладных:

Среднемесячное количество морских коносаментов:

Среднемесячное количество авианакладных (AWB):

Среднемесячное количество ж/д накладных:

2.3. Информация об объемах услуг

Среднемесячное количество перевозимых грузов:

Среднемесячное количество регистрируемых операций по обработке грузов:

Среднемесячное количество платежных операций за оказанные услуги:

3. Информация об обработке грузов

Информация о вложенности груза в цепочку емкостей (контейнеров) при транспортировке Да Нет

Информация о фактическом перемещении груза между емкостями (контейнерами) при обработке Да Нет

Выполнение дополнительной маркировки товаров (Честный Знак и т.д.) Да Нет

4. Информация об электронном мониторинге геолокации

Информация о местоположении груза при транспортировке (отметки времени и геокоординат) Да Нет

Информация о местоположении транспортных средств при выполнении транспортировки (отметки времени и геокоординат) Да Нет

Среднемесячный объем регистрируемой информации электронного мониторинга геолокации:

5. Информация об Интернет-трекинге грузов пользователями

5.1 Информация о способе реализации Интернет-трекинга

Наличие личного кабинета Да Нет Наличие мобильного приложения Да Нет

Для защиты Интернет-трекинга используется внешний DDoS по арендной схеме Да Нет

Количество регистрируемых запросов Интернет-трекинга в месяц:

Типы получаемой информации о местоположении пользователей при трекинге (IP-адреса, координаты БС т.д.):

5.2 Способ идентификации пользователей при Интернет-трекинге

По внутреннему уникальному внутрисистемному идентификатору Да Нет

По номеру телефона Да Нет По адресу электронной почты Да Нет

6. Прочее

Иные имеющиеся сведения в произвольной форме

Рис. 3. Пример опросного листа
для реализации транспортно-логистических услуг

2. *Создание структурных и потоковых диаграмм*, описывающих особенности структуры ТЛУ, формирующей ИЦП и зависящей от существующих технологий управления и разделения функций, позволяющих оценить текущий уровень надежности и устойчивости узловых элементов ИЦП (рис. 4).



Рис. 4. Пример диаграммы транспортно-логистических услуг в интегрированных цепях поставок

3. *Проведение инспектирования* в интересах оценки состояния объектов и процессов в ИЦП, наиболее подверженных воздействию внешних и внутренних возмущающих факторов.

4. *Анализ существующей финансовой и управленческой документации*, в которой фиксируются все события, имеющие отношение к возникновению риска.

Используя необходимые, в том числе указанные методы, риск-менеджер получает оперативную информацию для купирования рисков, связанных с эффективностью использования финансовых ресурсов ИЦП и выполнением договорных обязательств по реализации ТЛУ (рис. 5).

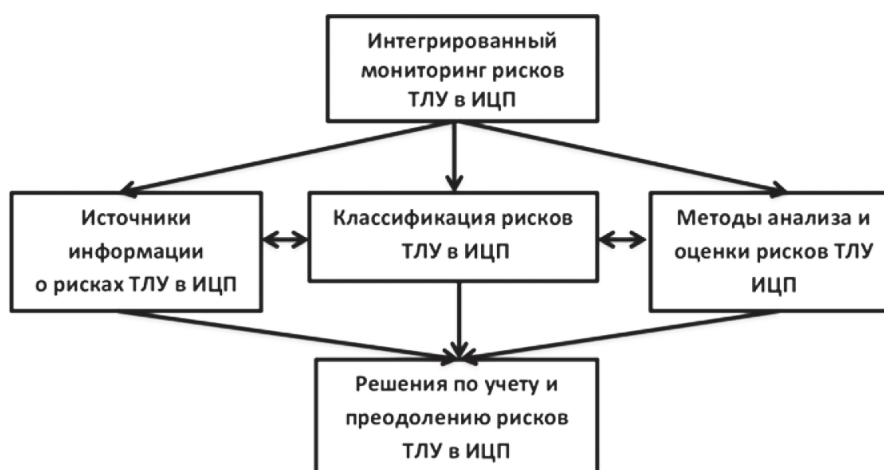


Рис. 5. Структура мониторинга рисков транспортно-логистических услуг в интегрированных цепях поставок

Полученные сведения позволяет ему оперативно и корректно формировать финансовые и коммерческие решения в целях минимизации операционных потерь и увеличения прибыли в ИЦП при возникновении форс-мажорных обстоятельств.

Результаты (Results)

Скорость реакции на изменения внешней среды и внутреннего состояния объекта управления характеризует эффективность риск-менеджмента. Следовательно, в условиях форс-мажорных обстоятельств необходимо использовать такие технологии управления риском, которые позволяют оперативно оценивать конкретную экономическую ситуацию и принимать адекватное решение.

Учитывая сложность реализации ТЛУ в современных ИЦП, где каждый участник имеет свою организационно-техническую и информационную среду для определения источников риска, ключевой задачей группы экспертов — риск-менеджеров является оперативное выявление,

классификация угроз и разработка предложений для принятия решений по максимальному купированию этих угроз. Очевидно, что организация и выполнение работ по сбору информации и выявлению рисков в ИЦП требует соответствующей поддержки с применением средств новых информационных технологий.

Релевантным средством решения задач риск-менеджмента в ИЦП является система интеллектуальной поддержки (СИП), реализующая технологию инженерии знаний [9–14]. Важным элементом в структуре СИП является рассмотренная ранее процедура составления списка источников информации, тесно связанная с предметной базой знаний. Используемые методы системного анализа, позволяющие учитывать субъективные мнения риск-менеджеров и обеспечивать интеграцию алгоритмов количественной оценки и сравнения многокритериальных альтернатив с экспертными процедурами, являются основой для оценки альтернатив в СИП при принятии решений по управлению ТЛУ в условиях форс-мажорных обстоятельств [14]. «Ядро» подобной СИП в общем виде приведено на рис. 6.

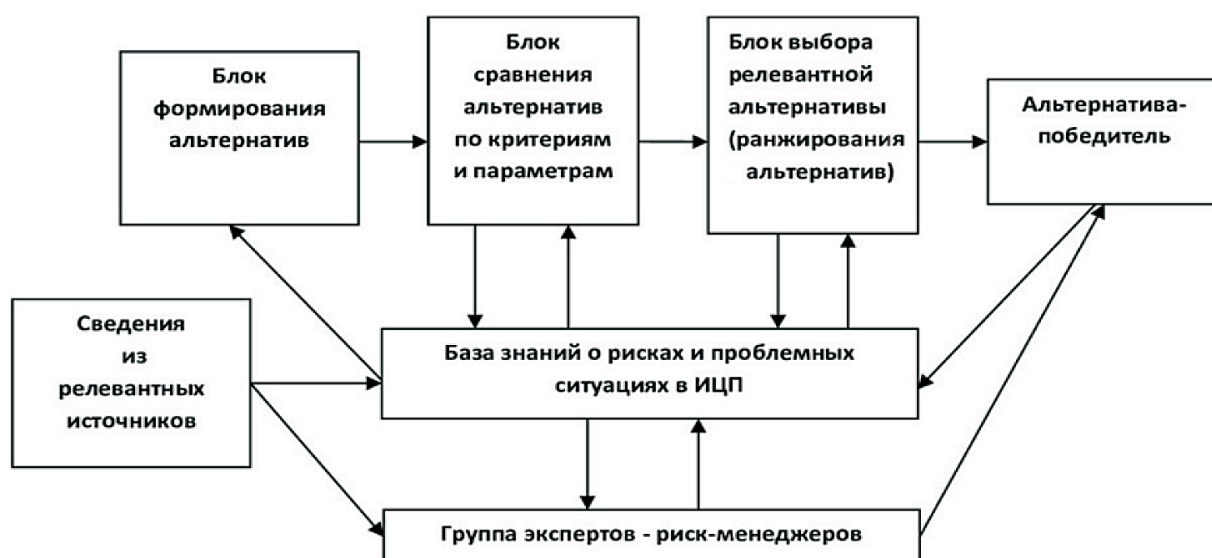


Рис. 6. Ядро системы интеллектуальной поддержки

В рамках интегрированных цепей поставок особую роль с точки зрения риск-менеджмента играют критические точки, в которых концентрируются транспортные потоки и формируются предпосылки для возникновения рисков. К числу таких точек относятся объекты водного транспорта: морские и речные порты, перегрузочные терминалы, акватории с ограниченной пропускной способностью, узлы сопряжения водного транспорта с другими видами перевозок в составе мультимодальных логистических схем, которые характеризуются высокой концентрацией операций и ограниченной заменяемостью. Нарушение функционирования перечисленных объектов под воздействием природных, технико-технологических или организационных факторов может приводить к непропорционально значительным последствиям для всей ИЦП. В этой связи критические точки водного транспорта следует рассматривать как отдельные объекты мониторинга в СИП, требующие отдельного набора показателей и критериев оценки рисков. Включение параметров функционирования критических точек водного транспорта в базу знаний СИП позволяет учитывать пространственно-временные ограничения перевозочного процесса, формировать более обоснованные альтернативы управленческих решений и снижать вероятность реализации рисков в ИЦП.

Функционирование СИП осуществляется следующим образом. В блоке формирования альтернатив определяется начальное множество альтернативных вариантов решения на основе сведений о проблемной ситуации (ПС), поступающих из релевантных источников и содержащихся в базе

знаний. В блоке сравнения альтернатив с учетом заданных критериев присваиваются балльные оценки от 1 до 5 — a_i^k , где k — порядковый номер альтернативы; i — порядковый номер критерия.

Установлено соответствующее правило присваивания баллов:

- альтернатива, полностью соответствующая ПС — 5 баллов;
- альтернатива, в целом соответствующая ПС — 4 балла;
- альтернатива, частично соответствующая ПС — 3 балла;
- альтернатива, в основном несоответствующая ПС — 2 балла;
- альтернатива, полностью несоответствующая ПС — 1 балл.

Каждая альтернатива в результате получает суммарную оценку, выраженную в баллах:

$$T_k = \sum_{i=1}^N p_i a_i^k \quad \left| \quad \sum_{i=1}^N p_i = 1, \right. \quad (1)$$

где N — общее количество критериев; p_i — вес i -го критерия

Далее в блоке выбора альтернативы проводится итоговое ранжирование в соответствии целью решения задачи с применением, например, следующей формулы:

$$S_k = A \frac{C_{\min}}{C_k} + B \frac{T_k}{T_{\max}}, \quad (2)$$

где A — весовой коэффициент характеристики достижения цели (например, совокупная стоимость необходимых затрат); B — весовой коэффициент технической оценки альтернативы; $A, B \in [0; 1]$, $A + B = 1$; $C_{\min}$ — наименьшая стоимость не отклоненных заранее альтернатив; C_k — стоимость k -й альтернативы; $T_{\max}$ — наибольшая балльная техническая оценка альтернативы; T_k — балльная техническая оценка k -й альтернативы.

Полученные оценки S_k позволяют ранжировать альтернативы и определить лучшую, получившую максимальную оценку [14]. Применение СИП для оценки альтернатив позволяет существенно повысить обоснованность и оперативность решения задач риск-менеджмента, особенно при реализации в диалоговых системах оптимизации [15, 16].

Обсуждение (Discussion)

Важным аспектом интеллектуальной поддержки принятия решений при мониторинге ТЛУ является возможность визуализации используемых данных [17, 18]. Визуализация необходима для того, чтобы у риск-менеджера была возможность поместить показатели анализа и оценки рисков, действий и результатов в один наглядный образ. Эти показатели представляют определенную совокупность характеристик ИЦП с точки зрения риск-менеджмента, каждая из которых сравнивается с «целевым» значением в рамках одного краткого отчета, тем самым создается полезное представление о целенаправленной деятельности организации, а также требование о соблюдении общих целевых устремлений, отражающих достижение внешних требований, представленных в виде конкретных значений.

Основными указанными характеристиками ИЦП, подлежащими постоянному риск-мониторингу, являются:

- бизнес-процессы, необходимые для реализации качественных и конкурентоспособных ТЛУ;
- отношения с клиентами — потребителями ТЛУ;
- человеческие, организационные и информационные ресурсы;
- финансовые показатели функционирования ИЦП.

Эффектным средством визуализации в СИП является *аналитический дашборд*, в котором данные сгруппированы и расположены в соответствии с заданными целями и решаемыми задачами, причем изменение этих данных можно легко, быстро и наглядно отслеживать [19]. Использование дашборда как инструмента мониторинга ТЛУ позволяет ЛПР объективно оценивать функционирование бизнес-процессов, осуществлять оперативный анализ интегрированных данных и обоснованно принимать оптимальные решения при прогнозе поведения ИЦП (рис. 7).

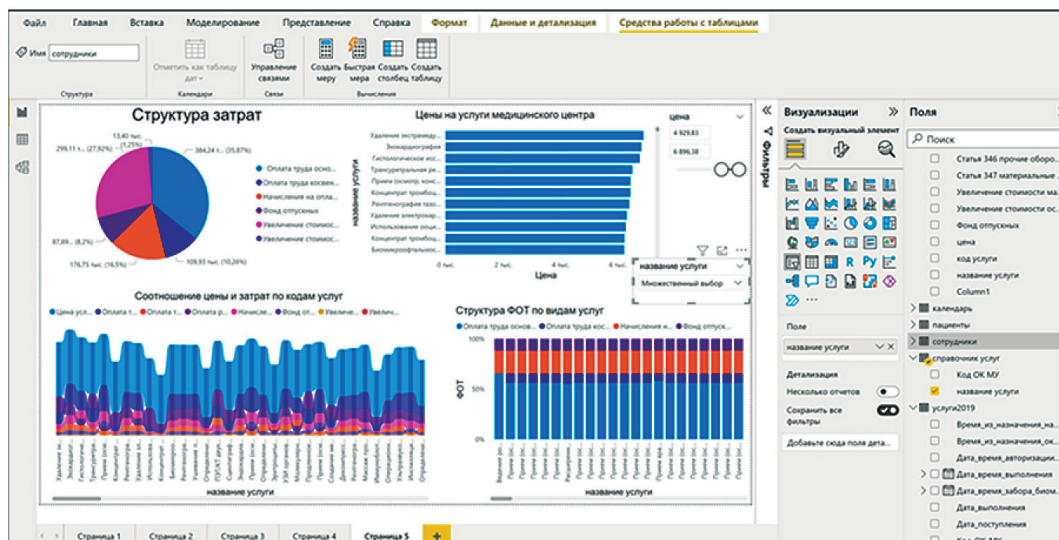


Рис. 7. Пример дашборда мониторинга рисков транспортно-логистических услуг в интегрированных цепях поставок

Рассмотрение объектов водного транспорта в качестве критических точек ИЦП позволяет повысить практическую применимость предложений СИП транспортно-логистических услуг. Учет каскадных эффектов, возникающих при нарушении функционирования портовой и водной инфраструктуры, является особенно актуальным в условиях форс-мажорных обстоятельств и высокой неопределенности внешней среды. Предложенный подход обеспечивает универсальность СИП и возможность ее адаптации к различным классам ТЛУ.

Выводы (Summary)

На основе проведенного исследования можно сделать следующие выводы:

1. Быстрое развитие, диверсификация, усложнение логистических процессов, а также усиление их социальной роли сопряжены с неизбежным ростом неопределенностей и рисков для жизнеспособности и эффективности ИЦП. Очевидным фактом является необходимость реализации проактивного управления, блокирующего потенциальные риски и потери эффективности до того, как они окажут воздействие на ИЦП. Важнейшим направлением, реализующим проактивное управление, является разработка и формирование СИП ТЛУ на основе риск-менеджмента.
2. Использование указанной СИП в интересах анализа и оценки уровня рисков в условиях форс-мажорных обстоятельств с подключением технологий аналитики Big Data позволяет создавать цифровые инструменты, которые на основе релевантной информации обеспечивают измерение необходимых показателей в интересах обеспечения жизнеспособности ИЦП.
3. Предложенный подход к интеллектуальной поддержке мониторинга транспортно-логистических услуг применим к различным классам ТЛУ, включая водный транспорт, объекты которого могут рассматриваться как критические точки интегрированных цепей поставок с повышенной риск-нагруженностью.

Благодарности (Acknowledgements)

Проведенные исследования выполнялись в рамках госбюджетной темы FFZF-2025–0020.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Iskanderov Y. Security of Information Processes in Supply Chains / Y. Iskanderov, M. Pautov // Proceedings of the Third International Scientific Conference "Intelligent Information Technologies for Industry" (IITI'18) — Springer International Publishing, 2019. — Pp. 13–22. DOI: 10.1007/978-3-030-01821-4_2.

2. *Искандеров Ю. М.* Модель интеллектуальной системы управления информационной безопасностью для цепей поставок на основе пространственных концепций акторно-сетевой теории / Ю. М. Искандеров, М. Д. Паутов // Информатизация и связь. — 2020. — № 5. — С. 94–106. DOI: 10.34219/2078-8320-2020-11-5-94-106. — EDN LCBWDJ.

3. *Искандеров Ю. М.* Мультиагентная модель риск-менеджмента цифровой сети поставок / Ю. М. Искандеров // Имитационное моделирование. Теория и практика (ИММОД-2025): Труды конференции, Санкт-Петербург, 15–17 октября 2025 года. — Санкт-Петербург: АО «ЦТСС», 2025. — С. 328–334. — EDN YRKJAC.

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

5. *Куклев Е. А.* Оценивание безопасности сложных систем на основе моделей рисков / Е. А. Куклев // Труды XV Международной конференции, Москва, 01–31 декабря 2007 года. Часть 1. — Москва 2007. — С. 93–97.

6. *Шурпак В. К.* Использование формализованной оценки безопасности для судовых аммиачных холодильных установок / В. К. Шурпак, Д. С. Семионичев, А. С. Реуцкий, А. А. Михеева // Научно-технический сборник Российского морского регистра судоходства. — 2024. — № 77. — С. 14–23. — EDN EBEQMS.

7. *Искандеров Ю. М.* Методы выявления знаний и их применение для создания интеллектуальных систем / Ю. М. Искандеров // Морские интеллектуальные технологии. — 2022. — Т. 1. — № 1(55). — С. 112–120. DOI: 10.37220/MIT.2022.55.1.014. — EDN LORZLV.

8. *Буцанец А. А.* Применение методов экспертного анализа для решения задач обеспечения живучести судовых и корабельных электроэнергетических систем / А. А. Буцанец, А. В. Саушев, Н. В. Широков // Морская радиоэлектроника. — 2024. — № 4(90). — С. 46–49. — EDN IOMMNS.

9. *Реуцкий А. С.* Применяемые в морской практике методы оценки рисков / А. С. Реуцкий, Д. С. Семионичев, А. А. Буцанец // Транспортное дело России. — 2025. — № 6. — С. 156–162. — EDN YSSWRR.

10. *Комашинский В. И.* На пути к новой, интеллектуально ориентированной, научно-технологической парадигме Российской Федерации / В. И. Комашинский, В. В. Каретников // Системы интеллектуального управления и искусственный интеллект: теория и практика: Сборник трудов III национальной научно-практической конференции, Санкт-Петербург, 24 апреля 2025 года. — Санкт-Петербург: Государственный университет морского и речного флота им. адмирала С. О. Макарова, 2025. — С. 64–74. — EDN HMJLFW.

11. *Андреева Е. В.* Использование фазовых диаграмм при выборе оптимальных маршрутов в акватории Севморпути / Е. В. Андреева, А. Л. Тезиков // Вестник государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2023. — Т. 15. — № 3. — С. 335–343. DOI: 10.21821/2309-5180-2023-15-3-335-343. — EDN ATNHTS.

12. *Язвенко М. Р.* Универсальная имитационная модель потока поступления круизных и паромных судов в морской пассажирский порт / М. Р. Язвенко // Вестник государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2025. — Т. 17. — № 3. — С. 350–364. DOI: 10.21821/2309-5180-2025-17-3-350-364. — EDN FKUCBV.

13. *Семионичев Д. С.* Применение формализованной оценки безопасности в качестве инструмента принятия решений с целью обеспечения безопасности морских судов / Д. С. Семионичев, В. К. Шурпак, А. С. Реуцкий // Сборник научных статей национальной научно-практической конференции профессорско-преподавательского состава ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова»: Сборник статей конференции, Санкт-Петербург, 30 сентября — 2024 года. — Санкт-Петербург: Государственный университет морского и речного флота им. адмирала С. О. Макарова, 2025. — С. 91–95. — EDN XBGKMS.

14. *Искандеров Ю. М.* Использование системы интеллектуальной поддержки при оценке альтернатив для выбора оптимального решения слабоструктурированных задач / Ю. М. Искандеров, Ф. Х. М. Аль От-аиби // Системный анализ в проектировании и управлении: Сборник научных трудов XXVIII Международной научно-практической конференции. В 2-х частях, Санкт-Петербург, 27–29 июня 2024 года. — Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, 2024. — С. 322–328. DOI: 10.18720/SPBPU/2/id24-529. — EDN ABIWXD.

15. *Искандеров Ю. М.* Интеллектуальная поддержка принятия решений в логистических системах / Ю. М. Искандеров, А. С. Свистунова, Д. С. Хасанов, А. С. Чумак // Морские интеллектуальные технологии. — 2021. — № 2–1(52). — С. 145–153. DOI: 10.37220/MIT.2021.52.2.021. — EDN OSVSZB.

16. Искандеров Ю. М. Информационная логистика — современный инструмент управления в цепях поставок / Ю. М. Искандеров, М. Д. Паутов // Информатизация и связь. — 2024. — № 4. — С. 59–65. DOI: 10.34219/2078-8320-2024-15-59-65. — EDN EDEVVS.

17. Искандеров Ю. М. Акторно-сетевое моделирование мультимодальных логистических процессов / Ю. М. Искандеров, С. В. Смоленцев, А. А. Буганец, М. Д. Паутов // Научные исследования в космических исследованиях Земли. — 2023. — Т. 15. — № 5. — С. 57–67. DOI: 10.36724/2409-5419-2023-15-5-57-67. — EDN JTSOOI.

18. Романова И. К. Современные методы визуализации многомерных данных: анализ, классификация, реализация, приложения в технических системах / И. К. Романова // Наука и образование: научное издание МГТУ имени Н. Э. Баумана. — 2016. — № 3. — С. 133–167. DOI: 10.7463/0316.0834876. — EDN VTKQIZ.

19. Искандеров Ю. М. Формирование информационной платформы для управления транспортно-технологическими процессами на основе больших данных / Ю. М. Искандеров, М. Б. Ласкин // Системный анализ в проектировании и управлении: Сборник научных трудов XXVIII Международной научно-практической конференции. В 2 частях, Санкт-Петербург, 27–29 июня 2024 года. — Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, 2024. — С. 316–322. DOI: 10.18720/SPBPU/2/id24–528. — EDN KGTKWA.

REFERENCES

1. Iskanderov, Y. and M. Pautov. “Security of Information Processes in Supply Chains.” *Proceedings of the Third International Scientific Conference “Intelligent Information Technologies for Industry” (IITI'18)*. Springer International Publishing, 2019: 13–22. DOI: 10.1007/978-3-030-01821-4_2.

2. Iskanderov, Yu. M. and M. D. Pautov. “The model of an intelligent information security control system for supply chains based on the spatial concepts of the actor-network theory.” *Informatizatsiya i svyaz' 5* (2020): 94–106. DOI: 10.34219/2078-8320-2020-11-5-94-106.

3. Iskanderov, Yu. M. “Multi-agent risk management model for a digital supply chain.” *Imitatsionnoe modelirovanie. Teoriya i praktika (IMMOD-2025): Trudy konferentsii, Sankt-Peterburg, 15–17 oktyabrya 2025 goda*. Sankt-Peterburg: AO «TsTSS», 2025: 328–334.

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

5. Kuklev, E. A. “Otsenivanie bezopasnosti slozhnykh sistem na osnove modeley riskov.” *Trudy XV Mezhdunarodnoy konferentsii, Moskva, 01–31 dekabrya 2007 goda. Chast' 1*. Moskva: 2007: 93–97.

6. Shurpyak, V. K., D. S. Semionichev, A. S. Reutskiy and A. A. Mikheeva. “The use of a formalized safety assessment for marine ammonia refrigeration units.” *Research Bulletin by Russian Maritime Register of Shipping* 77 (2024): 14–23.

7. Iskanderov, Yu. M. “Knowledge identifying methods and their application to create intelligent systems.” *Marine Intelligent Technologies* 1.1(55) (2022): 112–120. DOI: 10.37220/MIT.2022.55.1.014.

8. Butsanets, A. A., A. V. Saushev and N. V. Shirokov. “Application of expert analysis methods to solve the problems of ensuring the survivability of ship and shipboard electric power systems.” *Marine Radioelectronics* 4(90) (2024): 46–49.

9. Reutskiy, A. S., D. S. Semionichev and A. A. Butsanets. “Risk assessment methods used in russian maritime register of shipping.” *Transport Business in Russia* 6 (2025): 156–162.

10. Komashinskiy, V. I. and V. V. Karetnikov. “Towards a new, intellectually oriented, scientific and technological paradigm of the russian federation.” *Sistemy intellektual'nogo upravleniya i iskusstvennyy intellekt: teoriya i praktika: Sbornik trudov III natsional'noy nauchno-prakticheskoy konferentsii, Sankt-Peterburg, 24 aprelya 2025 goda*. Sankt-Peterburg: Gosudarstvennyy universitet morskogo i rechnogo flota im. admirala S. O. Makarova, 2025: 64–74.

11. Andreeva, E. V. and A. L. Tezikov. “The use of phase diagrams when choosing optimal routes in the waters of the northern sea route.” *Vestnik gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 15.3 (2023): 335–343. DOI: 10.21821/2309-5180-2023-15-3-335-343.

12. Yazvenko, M. R. “Universal simulation model of cruise and ferry ships flow to a sea passenger port.” *Vestnik gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 17.3 (2025): 350–364. DOI: 10.21821/2309-5180-2025-17-3-350-364.

13. Semionichev, D. S., V. K. Shurpyak and A. S. Reutskiy. "The use of a formalized safety assessment for decision-making to ensure the safety of ships." *Sbornik nauchnykh statey natsional'noy nauchno-prakticheskoy konferentsii professorsko-prepodavatel'skogo sostava FGBOU VO "GUMRF imeni admirala S. O. Makarova": Sbornik statey konferentsii, Sankt-Peterburg, 30 sentyabrya — 20 2024 goda*. Sankt-Peterburg: Gosudarstvennyy universitet morskogo i rechnogo flota im. admirala S. O. Makarova, 2025: 91–95.

14. Iskanderov, Yu. M. and F. Kh. M. Al' Otaibi. "Using an intelligent support system in evaluating alternatives to select an optimal solution to weakly structured problems." *Sistemnyy analiz v proektirovanii i upravlenii: Sbornik nauchnykh trudov XXVIII Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii. V 2-kh chastyakh, Sankt-Peterburg, 27–29 iyunya 2024 goda*. Sankt-Peterburg: Sankt-Peterburgskiy politekhnicheskii universitet Petra Velikogo, 2024: 322–328. DOI: 10.18720/SPBPU/2/id24-529.

15. Iskanderov, Yu. M., A. S. Svistunova, D. S. Khasanov and A. S. Chumak. "Intelligent decision support in logistics systems." *Marine Intelligent Technologies* 2–1(52) (2021): 145–153. DOI: 10.37220/MIT.2021.52.2.021.

16. Iskanderov, Yu. M. and M. D. Pautov. "I information logistics — a modern management tool in supply chains." *Informatizatsiya i svyaz* 4 (2024): 59–65. DOI: 10.34219/2078-8320-2024-15-59-65.

17. Iskanderov, Yu. M., S. V. Smolentsev, A. A. Butsanets and M. D. Pautov. "Actor-network modeling multimodal logistics processes." *H&Es Reserch* 15.5 (2023): 57–67. DOI: 10.36724/2409-5419-2023-15-5-57-67.

18. Romanova, I. K. "Modern methods of multidimensional data visualization: analysis, classification, implementation, and applications in technical systems." *Science and Education of The Bauman Mstu* 3 (2016): 133–167. DOI: 10.7463/0316.0834876.

19. Iskanderov, Yu. M. and M. B. Laskin. "Formation of an information platform for management of transportation and technological processes based on big data." *Sistemnyy analiz v proektirovanii i upravlenii: Sbornik nauchnykh trudov XXVIII Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii. V 2-kh chastyakh, Sankt-Peterburg, 27–29 iyunya 2024 goda*. Sankt-Peterburg: Sankt-Peterburgskiy politekhnicheskii universitet Petra Velikogo, 2024: 316–322. DOI: 10.18720/SPBPU/2/id24-528.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Искандеров Юрий Марсович —

доктор технических наук, профессор,
главный научный сотрудник, руководитель
лаборатории интеллектуальных систем,
Санкт-Петербургский Федеральный
исследовательский центр РАН,
199178, Российская Федерация, Санкт-Петербург,
14 линия, 39

e-mail: iskanderov.y@iias.spb.su

Буцанец Артем Александрович —

кандидат технических наук,
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала
С. О. Макарова
198035, Российская Федерация, Санкт-Петербург,
ул. Двинская, 5/7

e-mail: butsanetsaa@gumrf.ru

Шаркова Василиса Павловна — специалист,

ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала
С. О. Макарова
198035, Российская Федерация, Санкт-Петербург,
ул. Двинская, 5/7

email: sharkovavp@gumrf.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Iskanderov Yuri Marsovich —

Grand PhD in Technical Sciences, Professor,
Chief Researcher, Head of the Laboratory
of Intelligent Systems,
St. Petersburg Federal Research Center
of the Russian Academy of Sciences,
199178, Russian Federation,
St. Petersburg, line 14, 39

e-mail: iskanderov.y@iias.spb.su

Butsanets Artem Aleksandrovich —

PhD in technical sciences,
Admiral Makarov State University of Maritime
and Inland Shipping,
5/7 Dvinskaya Str., St. Peterburg, 198035,
Russian Federation

e-mail: butsanetsaa@gumrf.ru

Sharkova Vasilisa Pavlovna — specialist,

Admiral Makarov State University of Maritime
and Inland Shipping,
5/7 Dvinskaya Str., St. Peterburg, 198035,
Russian Federation

email: sharkovavp@gumrf.ru

Статья поступила в редакцию: 28 ноября 2025 г.

Received: Nov. 28, 2025

Научное издание

Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова

Том 18. № 1

2026 год

Выпускающий редактор *Н. А. Карамзина*
Дизайн и верстка *М. Н. Евсюткина*

Подписано в печать 25.02.26. Дата выхода в свет 27.02.26
Формат 60×90/8. Усл. печ. л. 20,5.
Тираж 500 (первый завод 30) экз. Свободная цена. Заказ № 47/26

Государственный университет морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова
198035, Санкт-Петербург, ул. Двинская, 5/7

Издательство ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова
198035, Санкт-Петербург, Межевой канал, 2

Отпечатано на полиграфической базе издательства ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова
198035, Санкт-Петербург, Межевой канал, 2