

# Труды Санкт-Петербургского государственного морского технического университета

## Transactions of the Saint Petersburg State Marine Technical University

<https://journals.eco-vector.com/2414-1437>

2025

Том  
VOLUME 4

Выпуск  
ISSUE 2



# ТРУДЫ Санкт-Петербургского государственного морского технического университета

ISSN 2414-1437 (Print)

16+

Том 4 | Выпуск 2 | 2025  
Сквозной номер (14)

ЕЖЕКВАРТАЛЬНЫЙ НАУЧНЫЙ РЕЦЕНЗИРУЕМЫЙ ЖУРНАЛ

Издается с 2017 года

<https://journals.eco-vector.com/2414-1437>

## УЧРЕДИТЕЛЬ И ИЗДАТЕЛЬ

Санкт-Петербургский государственный морской  
технический университет  
Россия, 190121, Санкт-Петербург, ул. Лоцманская, д. 3

Журнал зарегистрирован Федеральной службой  
по надзору в сфере связи, информационных тех-  
нологий и массовых коммуникаций, свидетельство  
о регистрации СМИ ПИ № ФС77-70733  
от 15 августа 2017 г.

Рекомендован ВАК

## Индексация

РИНЦ  
Crossref  
Lens  
OpenAlex  
Scilite  
Google Scholar

## ОТКРЫТЫЙ ДОСТУП

Статьи журнала распространяются в сети Интернет  
на условиях немедленного открытого доступа  
с лицензией CC BY 4.0

## ПОДПИСКА

Оформить подписку на печатную версию  
можно на сайте журнала:  
<https://journals.eco-vector.com/2414-1437>

## РЕДАКЦИЯ

Адрес: 190121, Санкт-Петербург,  
ул. Лоцманская, д. 3  
Тел. +7(812)714-06-44,  
e-mail: [journal@smtu.ru](mailto:journal@smtu.ru)

Оригинал-макет изготовлен ООО «Эко-Вектор»,  
Выпускающий редактор Н.Н. Репьева  
Корректор И.В. Смирнова  
Верстка А.Г. Хуторовская

Формат 60 × 84/8. Усл.-печ. л. 175.  
Тираж 500 экз. Цена свободная.  
Отпечатано в ООО «Типография Экспресс В2В»,  
191180, Санкт-Петербург, наб. Реки Фонтанки,  
д. 104, лит. А, пом. 3Н, оф. 1. Тел.: +7(812)646-33-77.  
Заказ № 5-6906-lv. Подписано в печать 30.06.2025.  
Выход в свет 09.07.2025

## Главный редактор

Денис Иванович Кузнецов — доктор технических наук, доцент, проректор по научной работе СПбГМТУ, заведующий кафедрой проектирования и технологии производства морских подводных аппаратов и роботов, (Санкт-Петербург, Россия)

## Ответственные секретари:

Владимир Олегович Кожемякин — канд. техн. наук, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет (Санкт-Петербург, Россия)

Никита Владимирович Тряскин — канд. техн. наук, доцент, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет, ORCID: 0000-0002-2208-2241 (Санкт-Петербург, Россия)

Александра Дмитриевна Егорова — Санкт-Петербургский государственный морской технический университет (Санкт-Петербург, Россия)

## Редакционный совет:

Глеб Андреевич Турчин (председатель) — д-р техн. наук, профессор, ректор СПбГМТУ (Санкт-Петербург, Россия)

Денис Иванович Кузнецов — д-р техн. наук, доцент, проректор по научной работе СПбГМТУ, заведующий кафедрой проектирования и технологии производства морских подводных аппаратов и роботов, eLibrary SPIN: 5128-0266 (Санкт-Петербург, Россия)

Алексей Евгеньевич Васильев — д-р техн. наук, доцент, декан факультета корабельной энергетики и автоматики, СПбГМТУ (Санкт-Петербург, Россия)

Вячеслав Анатольевич Дюк — д-р техн. наук, Институт проблем транспорта им. Н.С. Соломенко РАН (Санкт-Петербург, Россия)

Антон Александрович Жиленков — канд. техн. наук, доцент, декан факультета цифровых промышленных технологий, СПбГМТУ (Санкт-Петербург, Россия)

Сергей Александрович Исаев — д-р физ.-мат. наук, Санкт-Петербургский государственный университет гражданской авиации им. главного маршала авиации А.А. Новикова (Санкт-Петербург, Россия)

Лу Яньчжо — PhD, Харбинский инженерный университет (Харбин, Китай)

Александр Александрович Равин — д-р техн. наук, профессор кафедры судовой автоматики и измерений, СПбГМТУ (Санкт-Петербург, Россия)

Виталий Владимирович Сергеев — д-р техн. наук, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого (Санкт-Петербург, Россия)

Сяву Гун — PhD, Чжэцзянский океанический университет (Ханчжоу, Китай)

Сюе Яньчжо — PhD, Харбинский инженерный университет (Харбин, Китай)

Олег Яковлевич Тимофеев — д-р техн. наук, профессор кафедры конструкции и технической эксплуатации судов, СПбГМТУ (Санкт-Петербург, Россия)

Алексей Юрьевич Яковлев — д-р техн. наук, заведующий кафедрой гидроаэромеханики и морской акустики, СПбГМТУ (Санкт-Петербург, Россия)

## Редакционная коллегия:

Сергей Владимирович Вербицкий — канд. техн. наук, заведующий кафедрой океанотехники и морских технологий, СПбГМТУ (Санкт-Петербург, Россия)

Максим Валерьевич Власьев — канд. техн. наук, доцент кафедры проектирования судов, СПбГМТУ (Санкт-Петербург, Россия)

Сергей Яковлевич Галушин — канд. техн. наук, заведующий научно-исследовательской лабораторией информационных компьютерных систем, СПбГМТУ (Санкт-Петербург, Россия)

Ангела Алексеевна Грибанькова — д-р пед. наук, начальник управления организации научной работы, заведующий кафедрой химии, СПбГМТУ (Санкт-Петербург, Россия)

Марина Александровна Максимова — канд. техн. наук, доцент кафедры судовой автоматики и измерений, СПбГМТУ (Санкт-Петербург, Россия)

Олег Николаевич Петров — канд. техн. наук, доцент кафедры вычислительной техники и информационных технологий, СПбГМТУ (Санкт-Петербург, Россия)

Василий Михайлович Рычков — канд. воен. наук, декан факультета морского приборостроения, СПбГМТУ (Санкт-Петербург, Россия)

Александр Иванович Сетин — д-р тех. наук, заведующий кафедрой морских информационных систем и технологий, СПбГМТУ (Санкт-Петербург, Россия)

Алексей Петрович Сеньков — д-р тех. наук, профессор кафедры электротехники и электрооборудования судов, СПбГМТУ (Санкт-Петербург, Россия)

Юрий Леонардович Сиек — д-р тех. наук, заведующий кафедрой систем автоматического управления и бортовой вычислительной техники, СПбГМТУ (Санкт-Петербург, Россия)

Алексей Вячеславович Солодко — канд. воен. наук, доцент кафедры проектирования и технологии производства морских подводных аппаратов и роботов, СПбГМТУ (Санкт-Петербург, Россия)

Никита Владимирович Тряскин — канд. техн. наук, декан факультета кораблестроения и океанотехники, СПбГМТУ (Санкт-Петербург, Россия)

Георгий Владимирович Черкаев — канд. техн. наук, заведующий кафедрой судовых энергетических установок, систем и оборудования, СПбГМТУ (Санкт-Петербург, Россия)



Редакция не несет ответственности за содержание рекламных материалов. Точка зрения авторов может не совпадать с мнением редакции. К публикации принимаются статьи, подготовленные только в соответствии с правилами для авторов. Направляя статью в редакцию, авторы принимают условия договора публичной оферты. С правилами для авторов и договором публичной оферты можно ознакомиться на сайте <https://journals.eco-vector.com/2414-1437>. Полное или частичное воспроизведение материалов, опубликованных в журнале, допускается только с разрешения издателя и редакции, ссылка на журнал обязательна.

# TRANSACTIONS of the Saint Petersburg State Marine Technical University

ISSN 2414-1437 (Print)

Volume 4 | Issue 2 | 2025

16+

QUARTERLY PEER-REVIEWED ACADEMIC JOURNAL

<https://journals.eco-vector.com/2414-1437>

## FOUNDER AND PUBLISHER

Saint Petersburg State Marine Technical University  
Address: 3 Lotsmanskaya st, Saint Petersburg,  
190121, Russia

Registered by the Federal Service for Supervision of  
Communications, Information Technology and Mass  
Media Registration number: ПИ No. ФС 77-70733  
as of August 15, 2017.

## INDEXATION

Russian Science Electronic Library (eLibrary.ru)  
Crossref  
Lens  
Openalex  
Scilite  
Google Scholar

## EDITORIAL CONTACT

Address: 3 Lotsmanskaya st, Saint Petersburg,  
190121, Russia  
E-mail: [journal@smtu.ru](mailto:journal@smtu.ru)  
Phone: +7(812)714-06-44

## SUBSCRIPTION

Subscription to the electronic version:  
<https://journals.eco-vector.com>  
<https://elibrary.ru>

## OPEN ACCESS

Articles freely available online with  
CC BY 4.0 license

## SUBSCRIPTION

To subscribe to the print issues follow:  
<https://journals.eco-vector.com/2414-1437>

## Editor-in-Chief

*Denis I. Kuznetsov* — Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Vice-Rector for Scientific Work, Head of the Department of Design and Production Technology of Marine Underwater Vehicles and Robots, Saint Petersburg State Marine Technical University (Saint Petersburg, Russia)

## Executive Secretaries

*Vladimir O. Kozhemyakin* — Candidate of Technical Sciences, Saint Petersburg State Marine Technical University (Saint Petersburg, Russia)

*Nikita V. Tryaskin* — Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Saint Petersburg State Marine Technical University, ORCID: 0000-0002-2208-2241 (Saint Petersburg, Russia)

*Alexandra D. Egorova* — Saint Petersburg State Marine Technical University (Saint Petersburg, Russia)

## Editorial Board

*Gleb A. Turichin* (Chairman) — Doctor of Technical Sciences, Professor, Rector, Saint Petersburg State Marine Technical University (Saint Petersburg, Russia)

*Denis I. Kuznetsov* — Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Vice-Rector for Scientific Work, Head of the Department of Design and Production Technology of Marine Underwater Vehicles and Robots, Saint Petersburg State Marine Technical University, eLibrary SPIN: 5128-0266 (Saint Petersburg, Russia)

*Alexey E. Vasiliev* — Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Dean of the Faculty of Ship Power Engineering and Automation, Saint Petersburg State Marine Technical University (Saint Petersburg, Russia)

*Vyacheslav A. Dyuk* — Doctor of Technical Sciences, N.S. Solomenko Institute of Transport Problems, Russian Academy of Sciences (Saint Petersburg, Russia)

*Anton A. Zhilenkov* — Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Dean of the Faculty of Digital Industrial Technologies, Saint Petersburg State Marine Technical University (Saint Petersburg, Russia)

*Sergey A. Isaev* — Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Saint Petersburg State University of Civil Aviation named after Chief Marshal of Aviation A.A. Novikov (Saint Petersburg, Russia)

*Lu Yanzho* — PhD, Harbin Engineering University (Harbin, China)

*Alexander A. Ravin* — Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Ship Automation and Measurements, Saint Petersburg State Marine Technical University (Saint Petersburg, Russia)

*Vitaly V. Sergeev* — Doctor of Technical Sciences, Peter the Great Saint Petersburg Polytechnic University (Saint Petersburg, Russia)

*Siwu Gong* — PhD, Zhejiang Ocean University (Hangzhou, China)

*Xue Yanzho* — PhD, Harbin Engineering University (Harbin, China)

*Oleg Ya. Timofeev* — Doctor of Technical Sciences, Professor, Department of Ship Design and Technical Operation, Saint Petersburg State Marine Technical University (Saint Petersburg, Russia)

*Alexey Yu. Yakovlev* — Doctor of Technical Sciences, Head of the Department of Hydroaeromechanics and Marine Acoustics, Saint Petersburg State Marine Technical University (Saint Petersburg, Russia)

## Editorial Council

*Sergey V. Verbitsky* — Candidate of Technical Sciences, Head of the Department of Ocean Engineering and Marine Technology, Saint Petersburg State Marine Technical University (Saint Petersburg, Russia)

*Maksim V. Vlasov* — Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Ship Design Department, Saint Petersburg State Marine Technical University (Saint Petersburg, Russia)

*Sergey Ya. Galushin* — Candidate of Technical Sciences, Head of Research Laboratory of Information Computer Systems, Saint Petersburg State Marine Technical University (Saint Petersburg, Russia)

*Angela A. Gribankova* — Doctor of Pedagogical Sciences, Head of Scientific Work Organisation Department, Head of Chemistry Department, Saint Petersburg State Marine Technical University (Saint Petersburg, Russia)

*Marina A. Maksimova* — Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Department of Ship Automation and Measurements, Saint Petersburg State Marine Technical University (Saint Petersburg, Russia)

*Oleg N. Petrov* — Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Department of Computer Science and Information Technologies, Saint Petersburg State Marine Technical University (Saint Petersburg, Russia)

*Vasily M. Rychkov* — Candidate of Military Sciences, Dean of the Faculty of Marine Instrumentation, Saint Petersburg State Marine Technical University (Saint Petersburg, Russia)

*Alexander I. Setin* — Doctor of Technical Sciences, Head of the Department of Marine Information Systems and Technologies, Saint Petersburg State Marine Technical University (Saint Petersburg, Russia)

*Alexey P. Senkov* — Doctor of Technical Sciences, Professor, Department of Electrical Engineering and Electrical Equipment of Ships, Saint Petersburg State Marine Technical University (Saint Petersburg, Russia)

*Yuri L. Siek* — Doctor of Technical Sciences, Head of Department of Automatic Control Systems and On-Board Computer Engineering, Saint Petersburg State Marine Technical University (Saint Petersburg, Russia)

*Alexey V. Solodko* — Candidate of Military Sciences, Associate Professor, Department of Design and Production Technology of Marine Underwater Vehicles and Robots, Saint Petersburg State Marine Technical University (Saint Petersburg, Russia)

*Nikita V. Tryaskin* — Candidate of Technical Sciences, Dean of the Faculty of Shipbuilding and Ocean Engineering, Saint Petersburg State Marine Technical University (Saint Petersburg, Russia)

*Georgiy V. Cherkaev* — Candidate of Technical Sciences, Head of the Department of Ship Power Plants, Systems and Equipment, Saint Petersburg State Marine Technical University (Saint Petersburg, Russia)



The editors are not responsible for the content of advertising materials. The point of view of the authors may not coincide with the opinion of the editors. Only articles prepared in accordance with the guidelines are accepted for publication. By sending the article to the editor, the authors accept the terms of the public offer agreement. The guidelines for authors and the public offer agreement can be found on the website: <https://journals.eco-vector.com/2414-1437>. Permissions to reproduce material must be obtained from the publisher and retained in order to confirm the legality of using reproduced materials.

# СОДЕРЖАНИЕ

---

## ИНФОРМАЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ

Разработка автоматизированных информационно-управляющих систем для повышения эффективности управления судами ..... 137  
*Д.О. Домашев, Ю.В. Ясинская*

Сравнение моделей систем управления движением манипулятора для необитаемого подводного аппарата ..... 147  
*Д.П. Кириченко, С.Ю. Сакович*

## МАШИНОСТРОЕНИЕ

Определение конфигурации гибкого кабель-троса при буксировке подводного объекта на течении заданного профиля ... 153  
*Н.В. Бабанин, А.Л. Мелконян*

Исследование антикоррозийных свойств эпоксидного покрытия, армированного графеном ..... 161  
*А.В. Иванов, Т.Р. Майгельдинов, В.В. Ваганов*

Оптимизационно-поисковое проектирование корпусных конструкций плавучего дока по требованиям к прочности и устойчивости при общем продольном изгибе ..... 169  
*В.Н. Тряскин, Д.Т. Иванова, В.А. Булкин*

Обоснование нормативного износа элементов конструкций плавучего дока в требованиях к общей прочности и устойчивости Правил РМРС на основе вероятностного моделирования ..... 181  
*Д.Т. Иванова, В.Н. Тряскин*

Использование критериев подобия при анализе результатов натурных испытаний современных газотурбинных двигателей; введение мощностного параметра ..... 189  
*П.Н. Коок, В.В. Поярков*

Влияние непризматичности трубопровода на параметры его вибрации ..... 197  
*А.Л. Мелконян, Д.А. Николаев, С.А. Яремчук*

Оценка трибологических свойств графитонаполненного полисульфона ..... 207  
*Н.А. Поляков, С.Г. Чулкин*

Возможности численных бессеточных методов для моделирования механического поведения ледовой среды ..... 215  
*А.А. Родионов, С.В. Рябушкин*

## СВАРКА, РОДСТВЕННЫЕ ПРОЦЕССЫ И ТЕХНОЛОГИИ

Применение текстурирования поверхности для повышения ресурсных характеристик инструмента ..... 229  
*Н.А. Астафьева, А.Е. Балановский*

Лазерно-индукционное термоупрочнение жаропрочных сталей ..... 237  
*А.Д. Ахметов, И.А. Цибульский, А.О. Сидоренко, В.В. Сомонов*

Термическая обработка разнородных лазерных сварных соединений Al-Cu-Li сплавов с существенной разницей в соотношении Li/Cu ..... 245  
*И.Е. Витошкин, А.Г. Маликов, А.П. Завьялов, Н.Ю. Бурхинова, Е.В. Карпов*

Результаты исследования технологической среды оптического спектра при лазерных процессах обработки материалов ... 253  
*О.А. Крючина, И.Н. Шиганов*

Разработка технологического процесса ремонта рабочих лопаток первой ступени турбины высокого давления газотурбинного двигателя ДР-59Л методом лазерной порошковой наплавки ..... 259  
*С.В. Тюков, Г.Г. Задыкан, Д.В. Мукин, Р.В. Мендагалиев, Р.С. Корсмик*

## ПОСТПУБЛИКАЦИОННЫЕ ИЗМЕНЕНИЯ

Сообщение о ретракции ..... 271

# CONTENTS

---

## INFORMATION TECHNOLOGIES AND TELECOMMUNICATIONS

- Development of Automated Information Control Systems to Improve Ship Management ..... 137  
*D.O. Domashev, Yu.V. Yasinskaya*
- Comparison of Manipulator Motion Control Systems for Unmanned Underwater Vehicles ..... 147  
*D.P. Kirichenko, S.Yu. Sakovich*

## MECHANICAL ENGINEERING

- Defining the Flexible Electro-Mechanical Cable Configuration When Towing Underwater Vehicle in Specific Current Profile ..... 153  
*N.V. Babanin, A.L. Melkonyan*
- Corrosion-Resisting Properties of Graphene-Reinforced Epoxy Coating ..... 161  
*A.V. Ivanov, T.R. Maigeldinov, V.V. Vaganov*
- Optimization and Search Design of Floating Dock Hull Structures Based on Strength and Stability Requirements Under Overall Longitudinal Bending State ..... 169  
*V.N. Tryaskin, D.T. Ivanova, V.A. Bulkin*
- Justification of the Specified Wear of Structural Elements of Floating Docks in the Overall Strength and Stability Requirements of the Rules of the Russian Maritime Register of Shipping by Probabilistic Modeling ..... 181  
*D.T. Ivanova, V.N. Tryaskin*
- Similarity Tests Used to Analyze Field Tests of State-of-the-Art Gas Turbine Engines: Introducing Power Parameter ..... 189  
*P.N. Kook, V.V. Poyarkov*
- Non-prismatic Pipelines and Their Vibration Parameters ..... 197  
*A.L. Melconian, D.A. Nikolaev, S.A. Yaremchuk*
- Tribological Evaluation of Graphite-Reinforced Polysulfone ..... 207  
*N.A. Polyakov, S.G. Chulkin*
- Potential of Meshless Numerical Methods for Mechanical Simulation of Ice Environment ..... 215  
*A.A. Rodionov, S.V. Ryabushkin*

## WELDING, RELATED PROCESSES AND TECHNOLOGIES

- Tool Life Improvement by Surface Texturing ..... 229  
*N.A. Astafeva, A.E. Balanovsky*
- Laser and Induction Hardening of Refractory Steels ..... 237  
*A.D. Akhmetov, I.A. Tsibulsky, A.O. Sidorenko, V.V. Somonov*
- Heat Treatment of Laser Welded Dissimilar Al-Cu-Li Joints With Significant Li/Cu Ratio Difference ..... 245  
*I.E. Vitoshkin, A.G. Malikov, A.P. Zavjalov, N.Yu. Burkhinova, E.V. Karpov*
- Optical Spectrum Process Environment in Laser Material Processing: A Study ..... 253  
*O.A. Kryuchina, I.N. Shiganov*
- Development of Laser Cladding Repair Process for First Stage Blading of High-Pressure Turbine for DR-59L Gas Turbine Engine ..... 259  
*S.V. Tyukov, G.G. Zadykyan, D.V. Mukin, R.V. Mendagaliev, R.S. Korsmik*

## POST-PUBLISHING CHANGES

- Notice of Article Retraction ..... 271

Оригинальное исследование

УДК 62-503.55

DOI: [https://doi.org/10.52899/24141437\\_2025\\_02\\_137](https://doi.org/10.52899/24141437_2025_02_137)

EDN: BGQTOV

# Разработка автоматизированных информационно-управляющих систем для повышения эффективности управления судами

Д.О. Домашев, Ю.В. Ясинская

Санкт-Петербургский государственный морской технический университет, Санкт-Петербург, Россия

## АННОТАЦИЯ

**Актуальность.** Информационно-управляющие системы (ИУС) играют ключевую роль в обеспечении эффективной поддержки управленческих решений на всех уровнях организационной иерархии. Особенно актуально это для капитанов и руководителей, которым необходимо оперативно получать, обрабатывать и распределять информацию в процессе планирования и контроля.

**Цель работы** — анализ особенностей функционирования ИУС на кораблях и разработка математической модели, позволяющей проводить углублённый расчёт систем на стадии исследовательского проектирования.

**Методы.** Использованы методы анализа международного опыта проектирования и эксплуатации ИУС, а также математического моделирования с возможностью проведения компьютерных экспериментов.

**Результаты.** Выделены три уровня управленческой деятельности — стратегический, тактический и оперативный — для каждого из которых определены требования к информации. Описаны принципы архитектуры и технические характеристики ИУС, важность участия пользователей в проектировании, необходимость обучения персонала и оптимизации затрат. Разработана математическая модель, позволяющая проводить компьютерные эксперименты, подтверждающие эффективность проектных решений.

**Выводы.** Эффективность ИУС напрямую зависит от правильного отбора информации, участия пользователей в проектировании и подготовки персонала. Представленная модель демонстрирует практическое применение теоретических подходов в реальных условиях и может служить основой для дальнейшего совершенствования ИУС на кораблях.

**Ключевые слова:** информационно-управляющие системы; управление; архитектура; математическая модель; компьютерный эксперимент.

## Как цитировать

Домашев Д.О., Ясинская Ю.В. Разработка автоматизированных информационно-управляющих систем для повышения эффективности управления судами // Труды Санкт-Петербургского государственного морского технического университета. 2025. Т. 4, № 2. С. 137–146. DOI: 10.52899/24141437\_2025\_02\_137 EDN: BGQTOV

Original study article

DOI: [https://doi.org/10.52899/24141437\\_2025\\_02\\_137](https://doi.org/10.52899/24141437_2025_02_137)

EDN: BGQTOV

# Development of Automated Information Control Systems to Improve Ship Management

Dmitriy O. Domashev, Yulia V. Yasinskaya

Saint Petersburg State Marine Technical University, Saint Petersburg, Russia

## ABSTRACT

**BACKGROUND:** Information control systems (ICS) play a key role in supporting effective management decision-making at all organizational levels. This is especially relevant for captains and managers who need to quickly receive, process, and distribute information during the planning and control.

**AIM:** To analyze the operational features of the ship ICS and develop a mathematical model for in-depth system design at the design study phase.

**METHODS:** The methods include analysis of international ICS design and operation practices and mathematical modeling with an option of computer experiments.

**RESULTS:** The authors identified three management levels, i.e. strategic, tactical, and operational, and determined information requirements on each level. The paper describes the ICS architecture and specifications, the importance of user involvement in design, and the need for staff training and cost reduction. The authors developed a mathematical model allowing to conduct computer experiments to prove the efficiency of design solutions.

**CONCLUSIONS:** Efficiency of ICS directly depends on the correct selection of information, user involvement in the design, and staff training. The presented model shows how theoretical approaches are used in real-life practice and may be used as a basis for further improvement of ICS for ships.

**Keywords:** information control systems; management; architecture; mathematical model; computer experiment.

## To cite this article

Domashev DO, Yasinskaya YuV. Development of Automated Information Control Systems to Improve Ship Management. *Transactions of the Saint Petersburg State Marine Technical University*. 2025;4(2):137–146. DOI: 10.52899/24141437\_2025\_02\_137 EDN: BGQTOV

Submitted: 10.02.2025

Accepted: 03.04.2025

Published online: 26.06.2025

## ВВЕДЕНИЕ

Информационно-управляющие системы (ИУС) выполняют важные функции по сбору, обработке и распределению информации на всех уровнях организационной иерархии, обеспечивая поддержку управленческих решений. Основными задачами, указанных систем, являются обеспечение капитана и других руководителей необходимой информацией для выполнения функций планирования и контроля.

Проектирование ИУС требует учета внешней среды и специфических информационных потребностей различных уровней управления. Различают три уровня управленческой деятельности: стратегический, тактический и оперативный. Каждый уровень требует соответствующей информации. На высшем уровне акцент делается на внешних источниках, а на низшем — на детализации и точности информации.

Для повышения эффективности ИУС рекомендуется участие пользователей в проектировании, обучение сотрудников, соблюдение соразмерности затрат и эффективности, а также правильный отбор информации. В рамках данной работы анализируется мировой опыт организации ИУС на корабле, рассматриваются принципы их архитектуры, а также проводится компьютерный эксперимент с расчетами и графическим представлением результатов.

## АНАЛИЗ МИРОВОГО НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКОГО ЗАДЕЛА В ЧАСТИ ЭТИХ СИСТЕМ

Современные морские информационно-управляющие системы формируют данные о надводной, подводной и воздушной обстановке для тактического управления кораблями и группировками. Они представляют собой сложный комплекс распределенных средств наблюдения, алгоритмов передачи и обработки информации, а также отображения данных на экранах. Совершенствование технологий принятия решений связано с увеличением автономности средств наблюдения, развитием систем связи и алгоритмов обработки информации.

Система, представленная в виде схемы, называется информационно-управляющей. На самом деле, это комплекс, объединяющий сбор, обработку и представление данных от сенсоров, таких как внешние антенны и датчики, включая информационно-управляющую часть. Элементы сети имеют возможность передачи данных и управления по акустическим и комбинированным каналам, таким как «акустика – радио» и «акустика – спутниковая радиосвязь». Данные, полученные под водой, передаются через серверы на обработку в систему сбора, обработки и управления. Кроме того, принимаются данные от системы оперативной океанографии для оценки и прогнозирования условий окружающей среды.

Процессоры, размещенные на корабле или берегу, решают задачи адаптации к условиям среды, слежения за целями, оптимального поиска и классификации, а также передачи данных. Эти функции обеспечивают установочные рекомендации для узлов системы в море, а управление системой осуществляется контроллером сети и наблюдательного поля через интерфейс. Объединенная обработка данных, полученных от элементов сети, позволяет эффективно управлять наблюдательным полем и адаптировать расположение мобильных элементов в зависимости от окружающих условий и тактической ситуации.

Функции информационно-управляющей системы направлены на обнаружение, классификацию и локализацию целей. Объединенная обработка данных повышает качество их обнаружения и позволяет определить параметры их движения. Кроме того, ИУС формирует интегральное представление тактической обстановки и окружающей среды, предлагая рекомендации по управлению.

Блок слежения за целью, называемый также блоком сбора данных, отвечает за обнаружение и сопровождение целей на основе информации о ее проходе через станции и данных о расстоянии и глубине. Блок оптимального поиска, обнаружения и классификации обеспечивает адаптивность к окружающей среде, оптимизируя поисковые характеристики мобильных узлов.

Алгоритмы, используемые для решения задач по направлению аппаратов и сенсоров, учитывают динамические характеристики, профили скорости звука и акустические потери. Такие оптимизационные задачи помогают максимизировать качество акустических характеристик и обеспечивают эффективное взаимодействие элементов системы.

Блок адаптации к условиям среды моделирует свойства сигналов акустической связи, учитывая доплеровский эффект для движущихся аппаратов. Прогноз характеристик связи позволяет планировать выполнение задач, оптимизируя поведение мобильных узлов в зависимости от условий распространения акустических волн.

Контроллер сети принимает рекомендации от функциональных блоков для перераспределения мобильных сенсоров, анализируя состояние энергетики узлов и информацию от внешних источников. Он определяет необходимость адаптации мобильных узлов и управляет параметрами системы, учитывая скрытность операций и ограничения на связь.

Интерфейс с наблюдательным полем представляет собой аппаратно-программные средства, предназначенные для работы с разнородными автономными устройствами. Этот интерфейс является центральным элементом системы управления развертываемыми устройствами, включая необитаемые подводные аппараты, и обеспечивает эффективное взаимодействие между всеми компонентами системы.



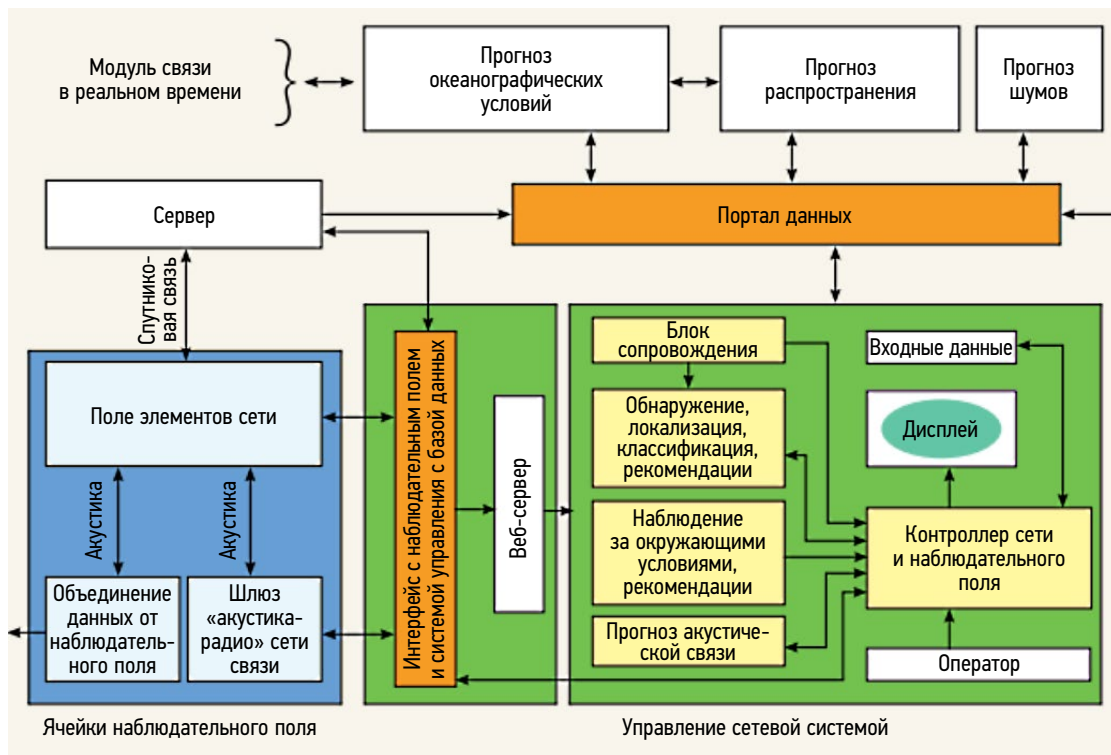


Рис. 1. Представление о составе и функциях информационно-управляющей.  
 Fig. 1. Components and functions of the information control system.

Для кораблей комплексы автоматизации становятся актуальными, поскольку к функциям информационно-управляющих систем добавляются управление оружием и борьба за живучесть. Объем автоматизации обосновывается эффективностью, стоимостью и возможностью уменьшения потерь личного состава.

Эффективность управления в условиях быстрменяющейся тактической обстановки определяется способностью всех звеньев быстро реагировать на угрозы, что оценивается временем реакции на обнаружение цели и подготовку оружия к действию.

С конца 60-х годов XX века несколько систем оружия начали объединять в комплексные системы для координированного боевого управления, что привело к созданию боевой информационно-управляющей системы (БИУС).

## АРХИТЕКТУРА ИНФОРМАЦИОННО-УПРАВЛЯЮЩИХ СИСТЕМ

Информационно-управляющие системы (ИУС) играют ключевую роль в современных военных кораблях, обеспечивая эффективное управление их боевыми действиями. Они позволяют быстро обрабатывать большие объемы данных и предоставлять актуальную информацию для принятия оперативных решений. Это особенно важно в условиях динамично меняющейся тактической обстановки, когда каждая секунда имеет значение. Основная цель ИУС — минимизация времени реакции на угрозы и оптимизация работы экипажа.

Одним из важных аспектов архитектуры ИУС является принцип совместимости. Это означает, что системы должны быть открытыми для интеграции с внешними источниками информации и другими системами. Указанное обстоятельство позволяет улучшить взаимодействие между различными компонентами и повысить общую эффективность управления. Применение стандартов в программном и аппаратном обеспечении способствует упрощению интеграции и модернизации систем.

Вместе с тем, значительное внимание в разработке ИУС уделяется безопасности. В условиях современного боя защита информации и управление доступом к системам становятся критически важными. Принцип безопасности включает в себя как физическую, так и информационную защиту, что позволяет предотвратить несанкционированный доступ и защитить систему от кибератак.

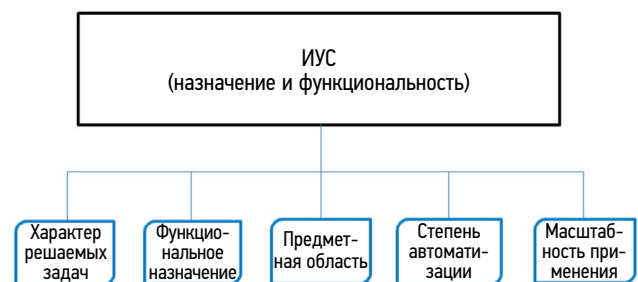


Рис. 2. Признаки классификации архитектур ИУС по назначению и функциональности.  
 Fig. 2. Classification attributes of ICS architectures (intended use and functions).



Рис. 3. Классификация архитектур ИУС по особенностям реализации.  
Fig. 3. Classification of ICS architectures by design specifications.

Функциональное назначение ИУС варьируется в зависимости от специфики задач, стоящих перед кораблем. Например, системы мониторинга и управления ресурсами позволяют эффективно распределять боеприпасы и контролировать состояние оборудования. Системы поддержки принятия решений помогают командирам в анализе ситуации и выборе оптимальных стратегий ведения боя, что особенно актуально в условиях ограниченного времени и высокой степени неопределенности.

Структура АСУ должна быть гибкой и адаптируемой, чтобы справляться с возможными сбоями или изменениями в боевой обстановке. Надежность системы, её способность к самовосстановлению и быстрая реакция на изменения становятся решающими факторами в успешном выполнении боевых задач. Поэтому при проектировании АСУ необходимо учитывать не только текущее состояние, но и потенциальные сценарии, которые могут возникнуть в ходе выполнения задач.

## ТЕХНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ИНФОРМАЦИОННО-УПРАВЛЯЮЩИХ СИСТЕМ

Понимание технических характеристик системы обеспечивает её соответствие поставленным задачам. К ним относятся:

- архитектура системы;
- надежность;
- масштабируемость;
- способность к восстановлению;
- наличие резервного копирования;

- защита от атак;
- интеграция с другими системами.

Минимизация рисков включает анализ вероятности того, что цели не будут достигнуты, что может привести к финансовым потерям. Для снижения рисков проводится комплексный анализ факторов и поэтапное внедрение решений с регулярной оценкой и модификацией.

Выделяются ключевые объекты затрат, такие как процесс создания системы, оборудование, ПО, персонал и управление задачами, для которых формируются характеристики, способствующие снижению рисков. Проектирование включает несколько этапов:

1. Анализ системы принятия решений.
2. Анализ информационных требований.
3. Агрегирование решений.
4. Проектирование процесса обработки информации.
5. Проектирование ИУС и системы контроля за её работой.

Разработка информационно-управляющих систем представляет собой комплекс научно-исследовательских, проектных и организационных работ, направленных на совершенствование существующей системы управления с использованием современных методов и вычислительной техники.

Совершенствование системы управления означает переход к качественно новому уровню её развития, что сопровождается изменением организационной структуры и принципов функционирования. Для большинства систем установлены следующие стадии их создания: предпроектная, разработка технического и рабочего проектов, ввод в эксплуатацию. В особых случаях, при разработке сложных и уникальных систем, может быть выделена стадия эскизного проекта.

Ход работ по созданию информационно-управляющих систем удобно представлять в виде сетевых графиков, которые включают множество операций. Обобщенный сетевой график укрупнённых этапов разработки даёт общее представление об основных стадиях создания и позволяет проследить путь от начала разработки до ввода в эксплуатацию.

Работы по созданию любой информационно-управляющей системы начинаются с предварительного ознакомления с будущей системой, что позволяет определить целесообразность её создания для конкретной организации. Обычно эту работу выполняет небольшая группа высококвалифицированных специалистов, которая включает в себя представителей заказчика и разработчиков.

Кроме того важным этапом является определение требований пользователей к системе, что помогает выявить конкретные задачи и функционал, необходимые для успешного выполнения поставленных целей. Такой подход позволяет учесть все нюансы и обеспечить соответствие системы ожиданиям её пользователей.

Наконец, тестирование и оценка системы перед её внедрением имеют решающее значение. Эти процессы помогают выявить возможные недостатки и доработать систему до уровня, удовлетворяющего всем требованиям. Систематическое обучение персонала также является ключевым элементом успешного внедрения, поскольку от навыков пользователей во многом зависит эффективность работы всей системы.

## МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ УГЛУБЛЕННОГО РАСЧЁТА ИУС КОРАБЛЯ НА СТАДИИ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ

Корабль состоит из основных подсистем и трансформируется в систему «Человек – машина», благодаря экипажу. Если в парусный период требовались сила и выносливость, то сейчас главными навыками являются

работа с информацией и принятие решений. Для экипажа корабль становится информационной системой.

Информационное взаимодействие формализуется через функционально-информационный контур, уровень автоматизации корабля влияет на функции экипажа. В современных условиях управление находится на частичном уровне автоматизации, с диагностическими системами для обслуживания, а автоматизация ремонта только начинает развиваться.

Информационные потоки разделяются на два подмножества: первое — между внешней средой и кораблём, второе — между подсистемами. Каждый поток характеризуется номенклатурой параметров, их количеством и законом распределения времени поступления.

Корабль включает такие подсистемы, как «Экипаж», «Информация и управление», «Энергия», «Движение», «Навигация», «Маневрирование», «Стабилизация», «Корпус». Каждая из них генерирует информацию, которая может быть использована для управления, и формирует иерархическую структуру.

Автоматизация управления может осуществляться двумя способами: на нижнем уровне управления или через принятие решений на любом уровне иерархии. Процесс проектирования ИУС состоит из трех этапов: определение технологии, построение структуры управления и разработка механизмов управления.

На первом этапе определяются функционально-информационные контуры, которые включают информацию о состоянии корпуса, движении, энергии, экипаже и навигации. Количество членов экипажа зависит от автоматических устройств и скорости обработки информации. Второй этап связан с определением специалистов и автоматов, а третий — с описанием взаимодействия между руководителями и подчинёнными, а также автоматами с механизмами.

Оптимизация управления кораблем включает в себя распределение информации и создание эффективной организационной структуры. Автоматизация может быть частичной, комплексной или полной, отражающей долю информации, замыкающейся на автомат или компьютер, что улучшает скорость и надежность принятия решений.

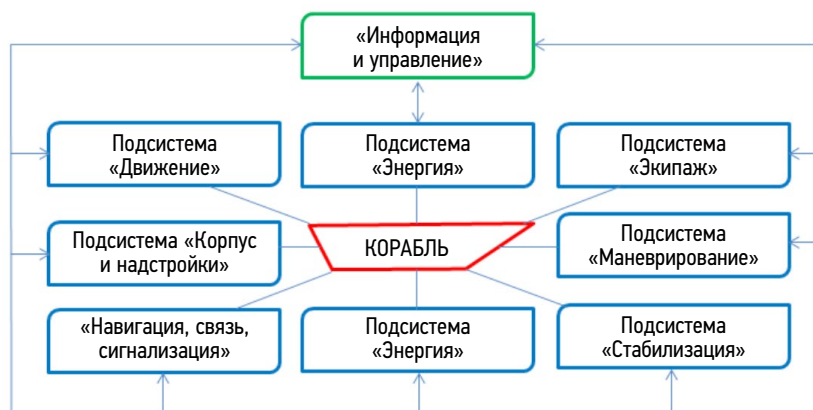


Рис. 4. Основные подсистемы корабля.

Fig. 4. Basic ship subsystems.

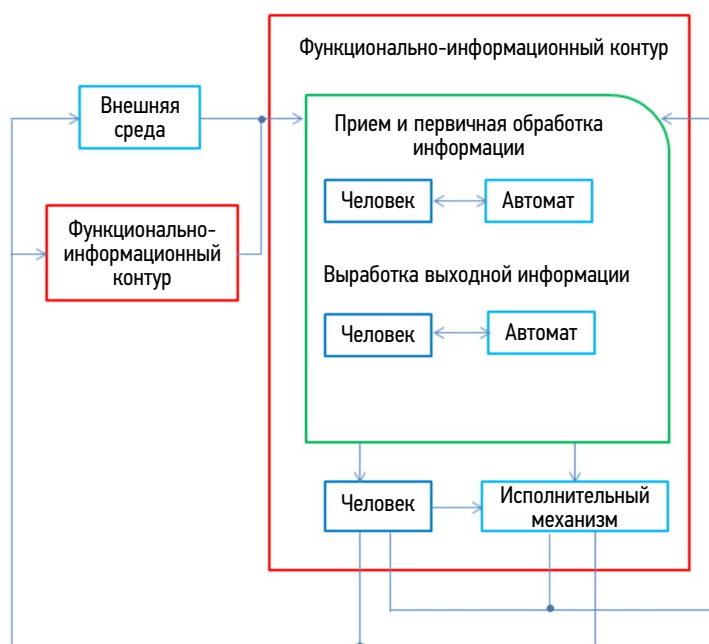


Рис. 5. Схема функционально-информационного контура.  
Fig. 5. Function and information loop diagram.

## ПЛАНИРОВАНИЕ И ПРОВЕДЕНИЕ КОМПЬЮТЕРНОГО ЭКСПЕРИМЕНТА

Рассмотрим проблему оптимизации структуры экипажа без автоматизации, что не снижает общности поставленной задачи. Создание оптимальной иерархической структуры обычно приводит к сложной оптимизационной задаче. Однако, учитывая принцип единовластия и традиции флотских экипажей, можно сделать упрощения. Высшие уровни занимают командир и его подчиненные, а структурированию подлежат функционально-информационные контуры (ФИК) корабля.

Задача ФИК заключается в надежной обработке первичной информации для командира боевой части, учитывающей скорость обработки и затраты на обучение и содержание экипажа. Оптимальная структура управления будет решаться методом поиска в глубину с отсечением по ограничениям. Для упрощения задачи принимаются следующие допущения:

- Древовидная структура управления.
- Все члены экипажа на одном уровне имеют одинаковую квалификацию.
- Квалификация зависит от скорости и правильности обработки информации.
- Разделение по специальностям не учитывается.
- Доклад состоит из одной информационной единицы.
- Информация обрабатывается непрерывно всеми участниками.
- Начальник может исправлять ошибки подчиненных.
- Ограниченное число иерархических уровней и членов экипажа для обеспечения обитаемости.

Исходные данные: количество информационных единиц ( $A^*$ ), максимально допустимое время ( $B^*$ ), минимально допустимая вероятность правильного решения ( $P^*$ ), максимально допустимая численность экипажа ( $N^*$ ).

Задана матрица квалификаций  $K$ :

$$K = \| \| K_{jq} \| \| j = 1, \dots, J; q = 1, \dots, Q,$$

где  $J$  — число видов квалификаций в данном ФИК;  $Q$  — число характеристик квалификации.

Оптимизируемые переменные образуют целочисленную матрицу:

$$X = \| \| X_{ij} \| \| I = 1, \dots, I; j = 1, \dots, J,$$

где  $X_{ij}$  — число членов экипажа, обладающих  $j$ -й квалификацией на  $i$ -м уровне управления;  $I$  — предельное число уровней управления данного ФИК.

Система ограничений образована следующими требованиями:

1. Все специалисты на  $i$ -м уровне управления должны иметь одинаковые квалификации:

$$\sum_{j \neq j^*}^j X_{ij} = 0; i = 1, \dots, I,$$

где  $j^*$  — выбранная на  $i$ -м уровне квалификация.

2. Все информационные единицы, поступающие на  $i$ -й уровень управления, должны быть обработаны:

$$a_j \cdot x_{ij} \geq A_i,$$

где  $a_j$  — число информационных единиц, перерабатываемых членом экипажа, имеющим  $j^*$ -ю квалификацию;  $A_i$  — число информационных единиц, поступающих на  $i$ -й уровень. Для первого уровня  $A_i = A^*$  для последующих  $A_i = x_{i-1, j^*}$ .

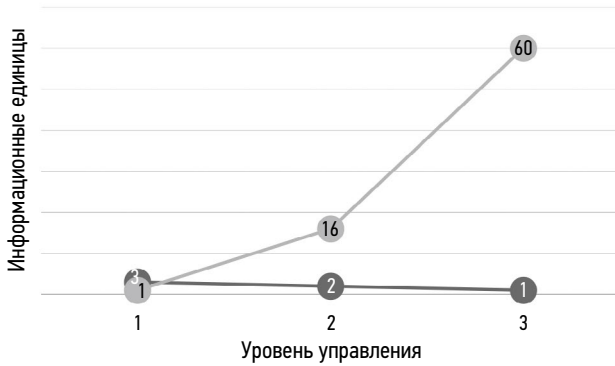


Рис. 6. Число информационных единиц, перерабатываемых членами экипажа.

Fig. 6. Information units processed by crew members.

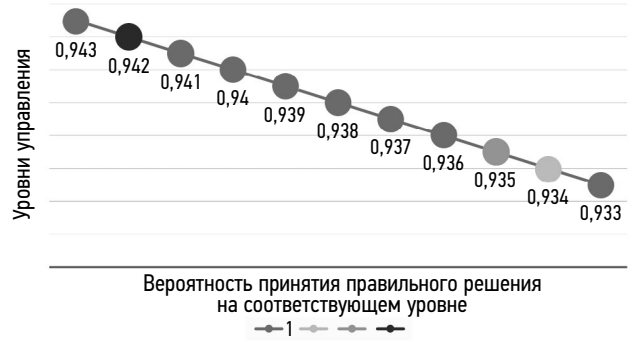


Рис. 7. Вероятность принятия правильных управленческих решений командиром БЧ.

Fig. 7. Probability of correct management decisions made by the department commander.

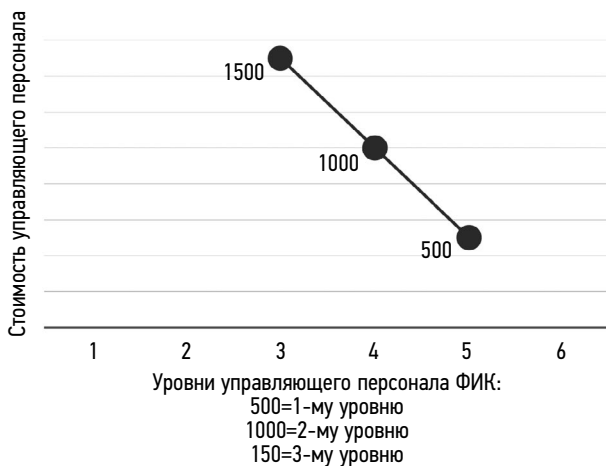


Рис. 8. Минимизируемая стоимость управляющего персонала ФИК.

Fig. 8. Reduced cost of the function and information loop control personnel.

3. Вероятность принятия правильных управленческих решений командиром БЧ должна быть не меньше заданной:

$$\prod_{i=1}^l (P_{i-1,j^*} + \Delta P_{ij}) \geq P^*,$$

где  $P_{ij}^*$  — вероятность принятия правильного решения на соответствующем уровне при выбранной для этого уровня квалификации экипажа;  $\Delta P_{ij}$  — поправка, учитывающая возможность корректировки управленческого решения, полученного на нижележащем уровне управления.

4. Длительность выработки решения командиром БЧ не должна превосходить нормативную:

$$\sum_{j=1}^l T_{ij} \leq T^*,$$

где  $T_{ij}^*$  — длительность обработки информации на  $i$ -м уровне управления при выбранной соответствующей квалификации.

Критерием эффективности (функция цели) задачи является минимизируемая стоимость управляющего персонала ФИК:

$$Z = \sum_{j=1}^l C_{ij} * x_{ij} \rightarrow \min$$

Проведём расчётный пример по формулам.

Условия:

- число информационных единиц в первичной информации  $A^* = 50$ ;
- максимально допустимое время прохождения информации до командира БЧ  $T^* = 60$  с;
- минимально допустимая вероятность правильного решения;
- управленческой задачи командиром БЧ  $P^* = 90$ ;
- максимально допустимая численность экипажа, необходимая для управления данным ФИК,  $N^* = 25$  человек.

Матрица квалификаций К:

$$K = \begin{vmatrix} 3 & 1 & 20 & 0,95 & 0 & 100 \\ 4 & 1 & 15 & 0,96 & 0,01 & 150 \\ 5 & 1 & 10 & 0,97 & 0,02 & 250 \\ 6 & 1 & 10 & 0,98 & 0,03 & 350 \\ 7 & 1 & 5 & 0,99 & 0,04 & 500 \end{vmatrix}$$

В матрице К строки соответствуют типам квалификаций, а столбцы — характеристикам квалификации:

- 1-й — число обрабатываемых входных информационных единиц;
- 2-й — число информационных единиц в докладе начальнику;
- 3-й — скорость обработки поступившей информации;
- 4-й — вероятность принятия правильного управленческого решения;
- 5-й — возможность корректировки решения подчиненных;
- 6-й — стоимость подготовки (абсолютно условные единицы).

Задача решается путем перебора возможных вариантов квалификаций от нижнего уровня иерархии управления к верхнему.

Результатом оптимизации является следующая структура управления ФИК:

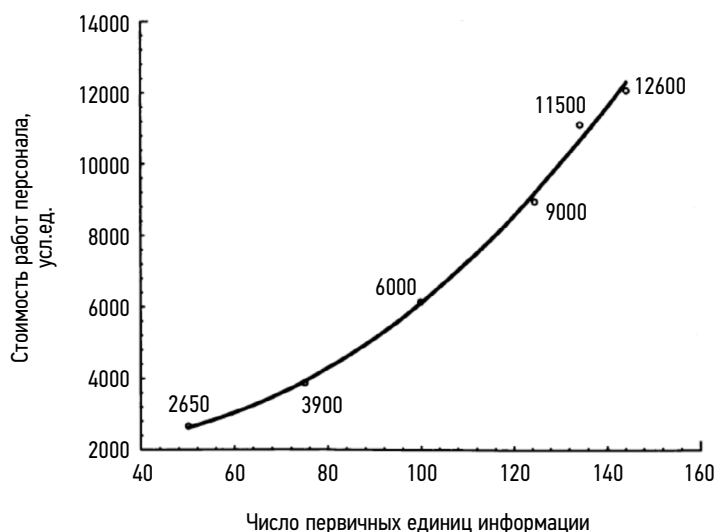


Рис. 9. Влияние объема перерабатываемой информации на стоимость работ персонала при ограничении его числа.  
Fig. 9. Influence of the amount of processed information on labor costs when the headcount is reduced.

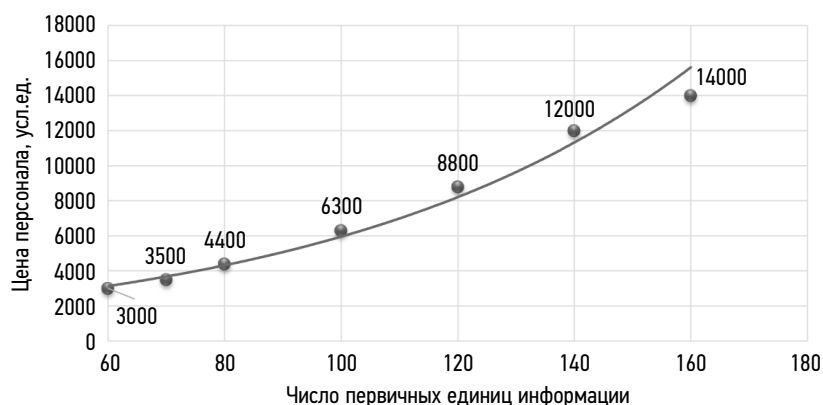


Рис. 10. Влияние объема перерабатываемой информации на заработную плату персонала при ограничении его численности.  
Fig. 10. Influence of the amount of processed information on personnel's salaries when the headcount is reduced.

- число уровней управления равно 3;
- квалификация на 1-м и 2-м уровнях — 1-я, а на 3-м — 4-я;
- численность экипажа на 1-м уровне — 17, на втором — 6, на 3-м (командир БЧ) — 1. Всего — 24 человека;
- вероятность принятия правильного решения 0,914;
- время прохождения информации 50 с;
- стоимость управленческого персонала 2650.85.

Представляет интерес зависимость параметров управленческой структуры от объема первичной информации. Такая зависимость для условий примера показана на рис. 9. При числе первичных единиц информации больше 150 создать управленческую структуру численностью не более 25 человек невозможно.

Интересен факт, что по мере роста первичной информации скорость ее прохождения и качество обработки увеличиваются, поскольку при ограничении численности

экипажа места на управленческих уровнях занимают лица с все более высокой квалификацией.

А также, в качестве эксперимента был построен график при численности экипажа,  $N^*=30$  человек.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Были рассмотрены общие принципы построения архитектуры информационно-управляющих систем корабля и требования к ним.

Также, приведена математическая модель углубленного расчёта информационно-управляющих систем корабля на стадии исследовательского проектирования, и благодаря математической модели произведён компьютерный эксперимент, который показал, что при числе первичных единиц информации больше 150 создать управленческую структуру численностью не более 25 человек невозможно.

## ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ИНФОРМАЦИЯ

**Вклад авторов.** Д.О. Домашев — поиск публикаций по теме статьи, написание текста рукописи; Ю.В. Ясинская — редактирование текста рукописи, создание изображений; Ю.В. Ясинская — экспертная оценка, утверждение финальной версии. Все авторы одобрили рукопись (версию для публикации), а также согласились нести ответственность за все аспекты работы, гарантируя надлежащее рассмотрение и решение вопросов, связанных с точностью и добросовестностью любой её части.

**Источники финансирования.** Авторы заявляют об отсутствии внешнего финансирования при проведении исследования.

**Конфликт интересов.** Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией настоящей статьи.

**Оригинальность.** При создании настоящей работы авторы не использовали ранее опубликованные сведения (текст, иллюстрации, данные).

**Генеративный искусственный интеллект.** При создании настоящей статьи технологии генеративного искусственного интеллекта не использовали.

**Рассмотрение и рецензирование.** Настоящая работа подана в журнал в инициативном порядке и рассмотрена по обычной процедуре. В рецензировании участвовали один внешний рецензент, член редакционной коллегии и научный редактор издания.

## ADDITIONAL INFO

**Author contributions:** D.O. Domashev: investigation, writing—original draft; Yu.V. Yasinskaya: writing—review & editing, visualization. All the authors approved the version of the manuscript to be published and agreed to be accountable for all aspects of the work, ensuring that questions related to the accuracy or integrity of any part of the work are appropriately investigated and resolved.

**Funding sources:** The study was not supported by any external sources.

**Disclosure of interests:** The authors have no explicit or potential conflicts of interests associated with the publication of this article.

**Statement of originality:** When creating this work, the authors did not use previously published information (text, illustrations, data).

**Generative AI:** No generative artificial intelligence technologies were used to prepare this article.

**Provenance and peer-review:** This work was submitted to the journal on its own initiative and reviewed according to the usual procedure. One external reviewer, a member of the editorial board and the scientific editor of the publication participated in the review.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кунин С.В. Гидроакустическая связь как средство управления силами военно-морского флота. В кн.: Состояние, перспективы развития: материалы конференции «Гидроакустическая связь и гидроакустические средства аварийно-спасательного назначения». СПб.: СевТехИздат, 2007. С. 93–101.
2. Склар Б. Цифровая связь. Теоретические основы и практические применения. М.: Изд. дом «Вильямс», 2007.

3. Зубченко Э.С., Шарков А.М. Перспективы использования автономных подводных необитаемых аппаратов для обеспечения ВМФ гидрографической и океанологической информации // Навигация и гидрография. 2014. № 37. С. 59–65. EDN: TPUMXP
4. Кебкал К.Г., Машонин А.И., Мороз Н.В. Пути решения проблем создания сетевой подводной связи и позиционирования // Гидроскопия и навигация. 2019. Т. 27, № 2 (105). С. 106–135. EDN: LKJCAS doi: 10.17285/0869-7035.2019.27.2.106-135

## REFERENCES

1. Kunin SV. Underwater Acoustic Communication as a Means of Naval Force Control. In: *Status and Development Prospects: Proceedings of the Conference "Underwater Acoustic Communication and Hydroacoustic Equipment for Emergency and Rescue Purposes"*. St. Petersburg: SevTekhIzdat; 2007:93–101. (In Russ.)
2. Sklar B. *Digital communication. Theoretical foundations and practical applications*. Moscow: Williams; 2007. (In Russ.)

3. Zubchenko ES, Sharkov AM. Prospects for the use of autonomous underwater uninhabited vehicles to provide the Navy with hydrographic and oceanological information. *Navigation and hydrography*. 2014;37:59–65. (In Russ.) EDN: TPUMXP
4. Kebkal KG, Mashonin AI, Moroz NV. Solution for underwater communication and positioning network development. *Gyroscoopy and Navigation*. 2019;27(2(105)):106–135. (In Russ.) EDN: LKJCAS doi: 10.17285/0869-7035.2019.27.2.106-135

## ОБ АВТОРАХ

**Юлия Владимировна Ясинская**, канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры систем автоматического управления и бортовой вычислительной техники, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет; e-mail: yasinskaya.spb@mail.ru

\***Дмитрий Олегович Домашев**, магистр, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет; e-mail: dima-domashev@mail.ru

## AUTHORS' INFO

**Yuliya V. Yasinskaya**, Cand. Sci. (Engineering), Associate Professor, Associate Professor of the Department of Automatic Control Systems and Onboard Computer Engineering; Saint Petersburg State Marine Technical University; e-mail: yasinskaya.spb@mail.ru

\***Dmitriy O. Domashev**, Master, Saint Petersburg State Marine Technical University; e-mail: dima-domashev@mail.ru

\* Автор, ответственный за переписку / Corresponding author

Оригинальное исследование

УДК 681.511.46

DOI: [https://doi.org/10.52899/24141437\\_2025\\_02\\_147](https://doi.org/10.52899/24141437_2025_02_147)

EDN: CLCSOI

# Сравнение моделей систем управления движением манипулятора для необитаемого подводного аппарата

Д.П. Кириченко, С.Ю. Сакович

Санкт-Петербургский государственный морской технический университет, Санкт-Петербург, Россия

## АННОТАЦИЯ

**Актуальность.** С развитием технологий и увеличением потребностей в исследованиях океанов необитаемые подводные аппараты с манипуляторами становятся важнейшими инструментами для выполнения сложных подводных задач. Эффективные системы управления манипуляторами обеспечивают высокую точность, надёжность и безопасность операций в труднодоступных условиях, что делает их развитие актуальной научно-технической задачей.

**Цель работы.** Провести сравнительный анализ моделей систем управления движением манипуляторами, применяемых в необитаемых подводных аппаратах.

**Материалы и методы.** В работе использованы методы моделирования кинематических схем манипулятора с помощью 3D-технологий и графических конструкций. Рассмотрены алгоритмы разомкнутого и замкнутого управления с обратной связью по положению захвата. Для стабилизации положения применён ПИ-регулятор.

**Результаты.** Моделирование показало, что при разомкнутом управлении манипулятор движется по гармоническому закону, однако при постоянном воздействии система становится неустойчивой. Введение обратной связи по положению захвата приводит к автоколебаниям, которые устраняются применением ПИ-регулятора. Полученные переходные характеристики демонстрируют улучшение устойчивости и управляемости манипулятора.

**Заключение.** Подход к управлению манипулятором с использованием замкнутой системы и регулятора позволяет обеспечить стабильное и точное выполнение подводных операций.

**Ключевые слова:** манипулятор; система управления; кинематическая схема; моделирование; программная среда; 3D модель.

## Как цитировать

Кириченко Д.П., Сакович С.Ю. Сравнение моделей систем управления движением манипулятора для необитаемого подводного аппарата // Труды Санкт-Петербургского государственного морского технического университета. 2025. Т. 4, № 2. С. 147–152. DOI: [10.52899/24141437\\_2025\\_02\\_147](https://doi.org/10.52899/24141437_2025_02_147) EDN: CLCSOI



Original study article

DOI: [https://doi.org/10.52899/24141437\\_2025\\_02\\_147](https://doi.org/10.52899/24141437_2025_02_147)

EDN: CLCSOI

# Comparison of Manipulator Motion Control Systems for Unmanned Underwater Vehicles

Dmitry P. Kirichenko, Sergey Yu. Sakovich

Saint Petersburg State Marine Technical University, Saint Petersburg, Russia

## ABSTRACT

**BACKGROUND:** As technology advances and the need for ocean exploration increases, unmanned underwater vehicles with manipulators are becoming critical tools for complex underwater missions. Efficient manipulator control systems ensure high operational precision, reliability, and safety in hard-to-reach locations, making their development a relevant science and technology objective.

**AIM:** This study aims to compare different manipulator motion control systems used in unmanned underwater vehicles.

**METHODS:** The study uses modelling techniques for kinematic diagrams of manipulators based on 3D technologies and graphic designs. The study reviews open and closed loop control algorithms with pick position feedback. A PI controller is used to stabilize the position.

**RESULTS:** The model showed that the manipulator moves harmonically with open loop control, but the system becomes unstable with permanent load. The introduction of pickup position feedback results in self-oscillations. However, they can be avoided by using a PI controller. The resulting transient curve shows improved stability and controllability of the manipulator.

**CONCLUSION:** The closed-loop and controller approach to manipulator control enables consistent and accurate underwater operations.

**Keywords:** manipulator; control system; kinematic diagram; modelling; software environment; 3D model.

## To cite this article

Kirichenko DP, Sakovich SYu. Comparison of Manipulator Motion Control Systems for Unmanned Underwater Vehicles. *Transactions of the Saint Petersburg State Marine Technical University*. 2025;4(2):147–152. DOI: 10.52899/24141437\_2025\_02\_147 EDN: CLCSOI

Submitted: 19.02.2025

Accepted: 05.05.2025

Published online: 20.06.2025

## ВВЕДЕНИЕ

С развитием технологий и увеличением потребностей в исследованиях океанов и морей, необитаемые подводные аппараты (НПА) становятся все более важными инструментами для научных, промышленных и исследовательских задач. Эти высокотехнологичные устройства осуществляют мониторинг морской среды, проводят геологоразведочные работы, исследуют морское дно и выполняют сложные инженерные операции на больших глубинах, где присутствие человека невозможно или небезопасно. В настоящее время роботы и манипуляторы находят широкое применение как в производстве, так и в быту. Быстрое внедрение роботов привело к интенсивному развитию теории их расчетов [1].

НПА — подводный аппарат без экипажа на борту, управление которым осуществляется автономной бортовой или дистанционной системой управления или сочетанием указанных способов [2].

Одной из ключевых особенностей современных НПА является наличие манипуляторов, которые значительно расширяют функциональные возможности аппаратов. Манипуляторы выполняют такие задачи, как сбор образцов, установка и обслуживание оборудования, а также взаимодействие с окружающей средой. Роботы становятся незаменимыми инструментами в различных областях, включая экологический мониторинг, подводное строительство и даже военные операции [3, 4].

Актуальность применения НПА с манипуляторами обусловлена несколькими факторами. Во-первых, НПА с манипуляторами становятся незаменимыми инструментами для проведения исследований и эксплуатации этих ресурсов. Эффективные системы управления позволяют точно выполнять поставленные задачи. Во-вторых, использование НПА для выполнения задач в опасных или труднодоступных условиях значительно снижает

риски для человека. Совершенные системы управления манипуляторами обеспечивают высокую точность и надежность операций, что критически важно при работе на больших глубинах или в условиях низкой видимости. В-третьих, развитие технологий в области автоматизации и робототехники открывает новые возможности для улучшения систем управления манипуляторами. Внедрение алгоритмов машинного обучения и искусственного интеллекта позволяет создавать адаптивные системы, которые могут самостоятельно принимать решения на основе анализа данных в реальном времени.

Таким образом, исследование и развитие систем управления НПА с манипуляторами не только актуально, но и необходимо для решения множества современных задач, связанных с исследованием и использованием океанов. В данной статье будет рассмотрен сравнительный анализ моделей систем управления движением манипуляторами, применяемых в НПА.

На рис. 1 представлена 3D модель манипулятора.

3D технологии позволяют представить модель со всех ракурсов и устранить недостатки, выявленные в процессе её создания [5].

На рис. 2 представлена кинематическая схема манипулятора. Схема — графический конструкторский документ, на котором составные части изделия и связи между ними представлены в виде условных изображений и графических обозначений [6]. Кинематические схемы показывают взаимодействие узлов и деталей механизма.

Задача манипулятора на НПА — обеспечение проведения подводных работ без прямого участия человека. Первый исследуемый алгоритм — разомкнутое управление манипулятором изображен на рис. 3. В рамках разомкнутого управления сигналы подаются оператором НПА. На рис. 1 и 2 видны основные части манипулятора: плечо, предплечье, кисть и захват.

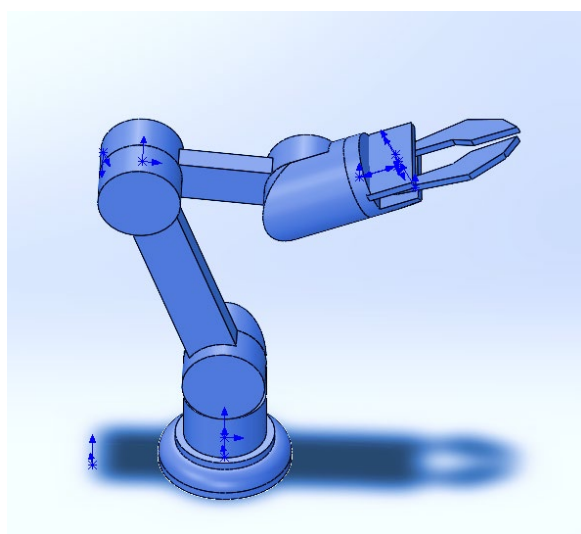


Рис. 1. 3D модель манипулятора.  
Fig. 1. 3D manipulator model.

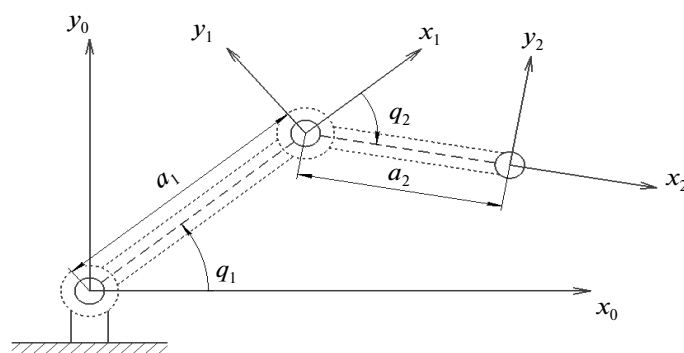


Рис. 2. Кинематическая схема манипулятора.  
Fig. 2. Kinematic diagram of the manipulator.

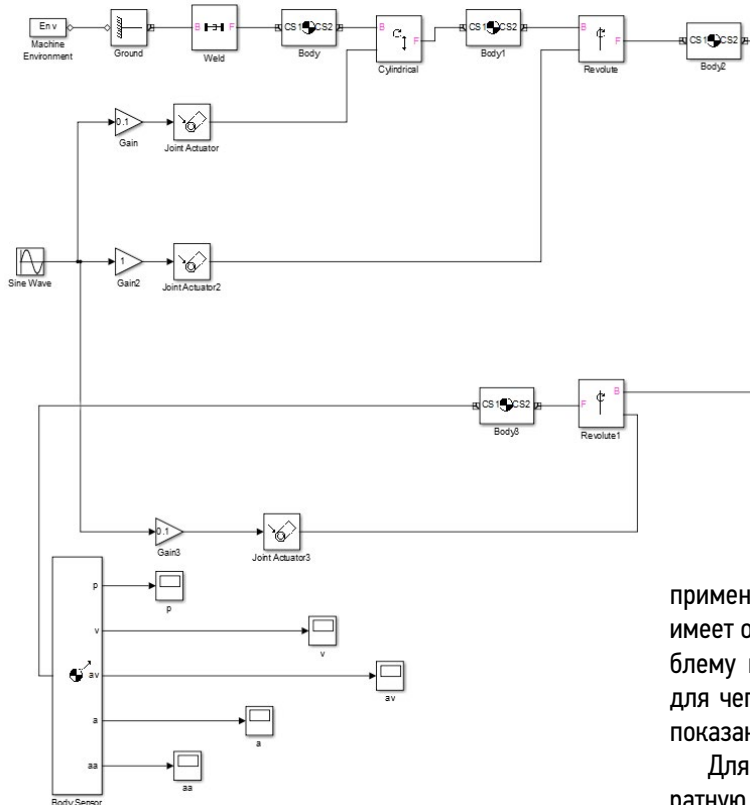


Рис. 3. Разомкнутое управление манипулятором робота.  
Fig. 3. Open loop control of the robot manipulator.

Схема, показанная на рис. 3, моделирует поведение манипулятора, состоящего из четырех идеальных твердых тел («Плечо» — блок Body, «Предплечье» — Body1, «Кисть» — Body2, «Захват» — Body3). Манипулятор приводится в движение одной цилиндрической и двумя угловыми передачами. Блоки Joint Actuator необходимы для передачи управляющего усилия на передачи, моделируя, таким образом, приводной двигатель. Блок Body Sensor позволяет получить координаты, скорость, линейные и угловые ускорения захвата.

Проведем моделирование разработанной схемы, подав на передачи синусоидальное воздействие. На рис. 4 показаны координаты захвата в функции времени.

Как видим из рис. 4, при разомкнутом управлении координата манипулятора изменяется по близкому к линейному закону. Рассмотрим изменение во времени скорости, линейного и углового ускорения вдоль рабочей оси (рис. 5).

Как видим, динамические характеристики манипулятора изменяются по гармоническому закону, что позволяет сделать вывод о движении захвата по окружности. Тем не менее, при выполнении подводных работ требуется реализация произвольного закона перемещения захвата. Проанализируем поведение захвата при скачкообразном задающем сигнале (рис. 6). Как видим, при подаче постоянного воздействия, манипулятор неустойчив, так как его координата неограниченно возрастает. Соответственно,

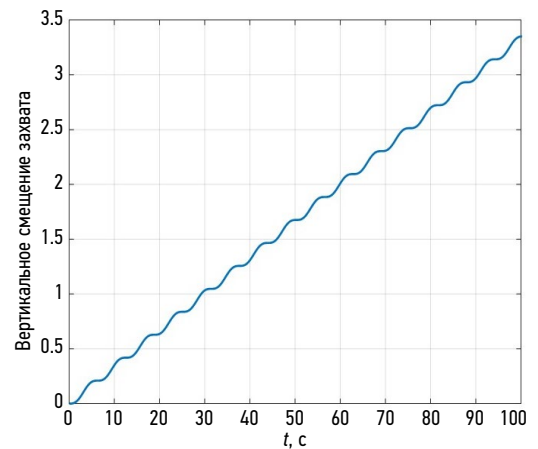


Рис. 4. Координата захвата в функции времени.  
Fig. 4. Pick coordinate as a function of time.

применение разомкнутого управления манипулятором имеет ограниченные возможности управления, и эту проблему необходимо решать введением обратной связи, для чего использован алгоритм замкнутого управления, показанный на рис. 7.

Для организации замкнутого управления введем обратную связь по положению захвата (рис. 7).

Построим переходную характеристику положения захвата при ступенчатом воздействии (рис. 8). Как видим из рис. 8, введение единичной обратной связи приводит к автоколебаниям положения. Соответственно, для стабилизации положения единичной обратной связи недостаточно и требуется введение регулятора. Используем ПИ-регулятор с параметрами  $K_p = 0,01$ ;  $K_i = 1$  с. На рис. 9 приведена соответствующая переходная характеристика.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Использование ПИ-регулятора в замкнутом контуре по положению захвата позволяет точно обрабатывать задающее воздействие с минимальным перерегулированием, в отличие от разомкнутого управления, не обеспечивающего ни точности, ни устойчивости регулирования манипулятора. Соответственно, использование обратных связей позволяет строить автоматизированные системы подводных работ.

Таким образом, объективно лучшими показателями качества обладает алгоритм замкнутого автоматического управления без участия оператора.

Манипуляторы в подводной среде обладают широкими возможностями, их развитие открывает новые перспективы для эффективного использования морских ресурсов. Будущие исследования и разработки в этой области будут способствовать созданию более надежных и универсальных решений, способных справиться с современными проблемами подводной робототехники.

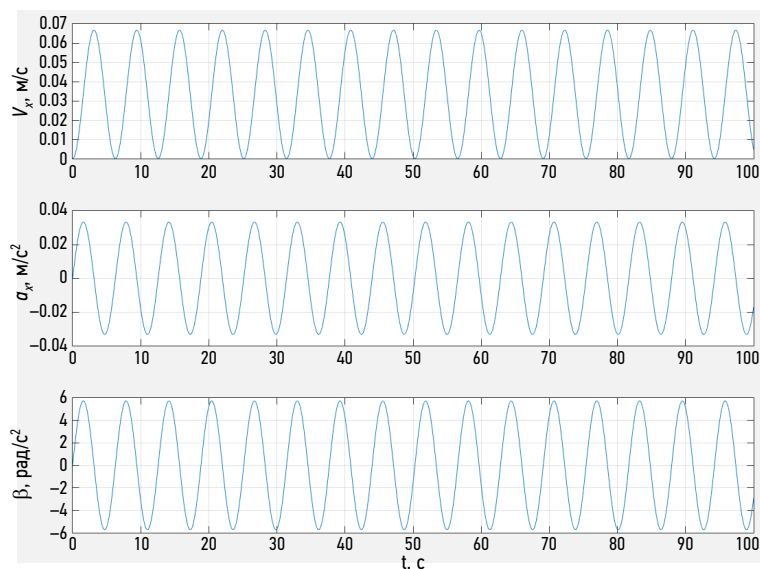


Рис. 5. Скорость и ускорения захвата.  
Fig. 5. Pick speed and acceleration.

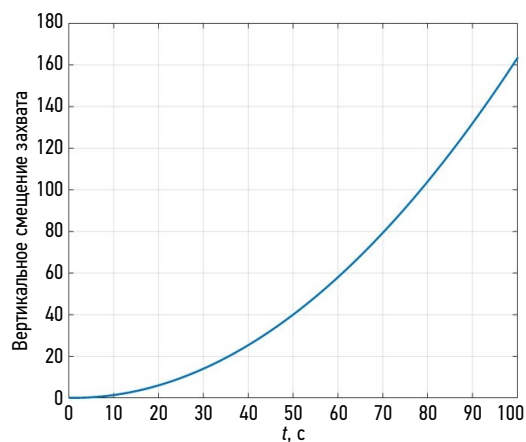


Рис. 6. Положение захвата при постоянном управляющем воздействии.  
Fig. 6. Pick position under constant controlling action.

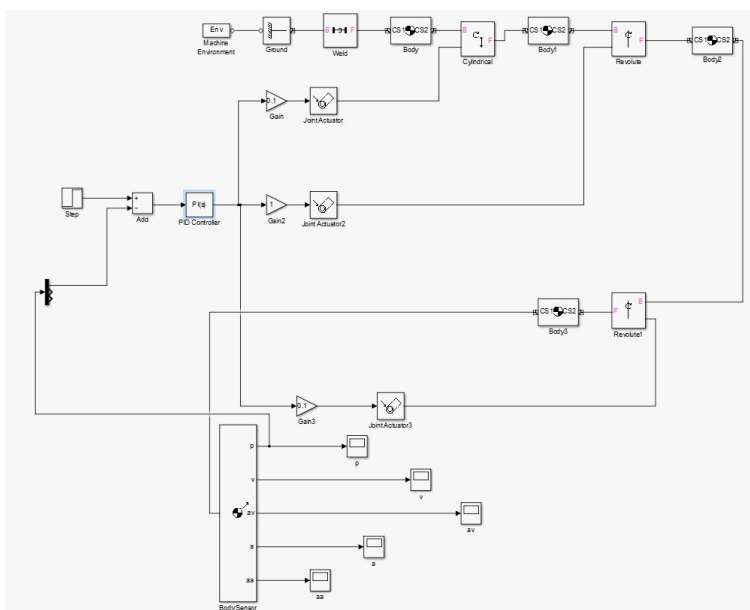


Рис. 7. Схема манипулятора с обратной связью по положению.  
Fig. 7. Diagram of a manipulator with position feedback.

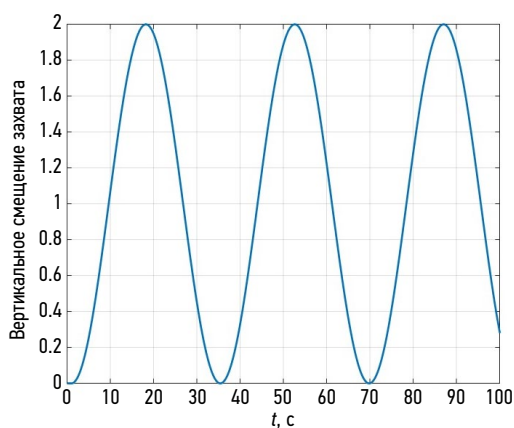


Рис. 8. Переходная характеристика положения захвата при единичной обратной связи.  
Fig. 8. Pick position transient curve with unity feedback.

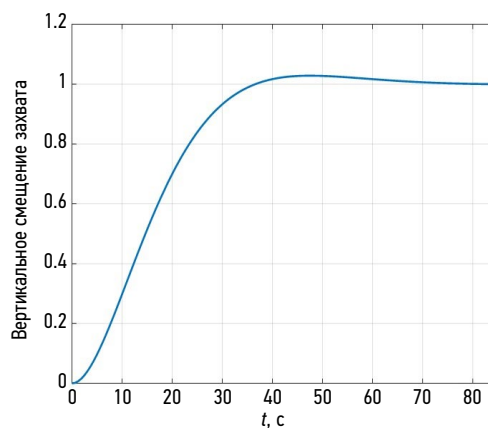


Рис. 9. Переходная характеристика положения захвата при ПИ-регулировании.  
Fig. 9. Pick position transient curve with PI control.

## ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ИНФОРМАЦИЯ

**Вклад авторов.** Все авторы внесли существенный вклад в разработку концепции, проведение исследования и подготовку статьи, прочитали и одобрили финальную версию перед публикацией. Личный вклад каждого автора: Д.П. Кириченко — написание текста, разработка концепции, анализ полученных данных, оформление рисунков; С.Ю. Сакович — руководство проведением исследования, редактирование текста.

**Источники финансирования.** Авторы заявляют об отсутствии внешнего финансирования при проведении исследования.

**Конфликт интересов.** Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией настоящей статьи.

**Генеративный искусственный интеллект.** При создании настоящей статьи технологии генеративного искусственного интеллекта не использовали.

## ADDITIONAL INFO

**Author contributions:** All the authors made substantial contributions to the conception of the study, acquisition, analysis, interpretation of data for the work, drafting and reviewing the article, final approval of the version to be published, and agreed to be accountable for all aspects of the study. Personal contribution of each author: D.P. Kirichenko: writing—original draft, conceptualization, formal analysis, visualization; S.Yu. Sakovich: supervision, writing—review & editing.

**Funding sources:** The study was not supported by any external sources.

**Disclosure of interests:** The authors have no explicit or potential conflicts of interests associated with the publication of this article.

**Generative AI:** No generative artificial intelligence technologies were used to prepare this article.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бабенко Е.В. Моделирование структуры роботов и манипуляторов // Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Технические науки. 2011. С. 41–45. EDN: NDERDT
2. ГОСТ Р 60.7.0.3–2023. Национальный стандарт Российской Федерации. Роботы и робототехнические устройства. Аппараты необитаемые подводные. Классификация (утв. и введен в действие Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 4 июля 2023. № 477-ст). М.: Стандартинформ, 2023.

3. Голобоков С.А. Автономные необитаемые подводные аппараты – носители минного оружия // Россия и АТР. 2009. № 2(64). С. 119–130. EDN: MSUKDV
4. Дулепов В.И., Лелюх Н.Н. Исследование и контроль состояния морских донных экосистем с использованием подводной робототехники // Гео-Сибирь. 2007. Т. 3. С. 117–120. EDN: PHIHGL
5. Проектное бюро. Дата обращения: 28.11.2024. Режим доступа: <https://kf.osu.ru/pb/2016/03/11/making-sure-you-have-a-great-harvest/>
6. Радионова Л.К., Полтавцева Т.А. Методические указания по курсу «Инженерная графика». М.: МЭИ, 1997.

## REFERENCES

1. Smeliagin AI, Babenko EV. Modeling the structure of robots and manipulators. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Severo-kavkazskiy region. Tekhnicheskie nauki*. 2011. № 1(159). P. 41–45. (In Russ.) EDN: NDERDT
2. GOST R 60.7.0.3–2023. National standard of the Russian Federation. Robots and robotic devices. Uninhabited underwater vehicles. Classification (approved and put into effect by the Order of the Federal Agency for Technical Regulation and Metrology) of 4 07 2023. № 477-st). Moscow: Standartinform; 2023. (In Russ.)

3. Golobokov SA. Autonomous uninhabited underwater vehicles – carriers of mine weapons. *Rossiya i ATR*. 2009;2(64):119–130. (In Russ.) EDN: MSUKDV
4. Dulepov VI, Lelyuh NN. Research and monitoring of the state of marine bottom ecosystems using underwater robotics. *Geo-Sibir*. 2007;3:117–120. (In Russ.) EDN: PHIHGL
5. Design bureau. [accessed: 28.11.2024] Available from: <https://kf.osu.ru/pb/2016/03/11/making-sure-you-have-a-great-harvest/> (In Russ.)
6. Radionova LK, Poltavtseva TA. *Guidelines for the course "Engineering Graphics"*. Moscow: MEI; 1997. (In Russ.)

## ОБ АВТОРАХ

**\*Дмитрий Павлович Кириченко**, магистр 2 курса, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет; адрес: 190121, Санкт-Петербург, ул. Лоцманская, 3, e-mail: dima01100190@gmail.com

**Сергей Юрьевич Сакович**, канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры систем автоматического управления и бортовой вычислительной техники, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет; eLibrary SPIN: 2426-9555; e-mail: sergeysakovich@mail.ru

## AUTHORS' INFO

**\*Dmitry P. Kirichenko**, 2nd year master's student, Saint Petersburg State Marine Technical University; address: Lotsmanskaya, 3, Saint Petersburg, 190121, Russia; e-mail: dima01100190@gmail.com

**Sergey Yu. Sakovich**, Cand. Sci. (Engineering), Associate Professor, Associate Professor of the Department of Automatic Control Systems and On-Board Computer Technology, Saint Petersburg State Marine Technical University; eLibrary SPIN: 2426-9555; e-mail: sergeysakovich@mail.ru

\* Автор, ответственный за переписку / Corresponding author

Научная статья

УДК 629.12:539.433

DOI: [https://doi.org/10.52899/24141437\\_2025\\_02\\_153](https://doi.org/10.52899/24141437_2025_02_153)

EDN: KUYBNJ

# Определение конфигурации гибкого кабель-троса при буксировке подводного объекта на течении заданного профиля

Н.В. Бабанин, А.Л. Мелконян

Санкт-Петербургский государственный морской технический университет, Санкт-Петербург, Россия

## АННОТАЦИЯ

**Актуальность.** Научно-исследовательские суда оснащены разнообразными лебедками, предназначенными для выполнения широкого спектра задач. В связи с этим возникает потребность в их проектировании и расчетах. На практике наиболее актуальными являются две основные задачи:

1. Определение конфигурации кабель-троса и глубины погружения подводного объекта (ПО) при заданной длине кабель-троса.

2. Определение длины кабель-троса, необходимой для обеспечения заданной глубины погружения ПО.

При расчетах учитываются параметры профиля течения и скорости буксировки подводного объекта. На первых стадиях (построение физической и математической моделей) для решения обеих задач применяется известный в теории корабля подход, базирующийся на «обращении движения», т. е. вместо рассмотрения движения объекта в жидкости мы рассматриваем обтекание жидкостью объекта. Поскольку процесс буксировки ПО происходит с постоянной скоростью, то в этом случае механическая система, состоящая из кабеля-троса и ПО, представляет собой систему с определенными параметрами. Это указывает на наличие у системы бесконечного числа степеней свободы. Положение равновесия этой механической системы неизвестно. Необходимо определить его.

**Цель работы** — расчет конфигурации гибкого кабель-троса при буксировке подводного объекта по течению заданного профиля с использованием численных методов и вычислительной техники.

**Объект исследования** — гибкий кабель-трос с прикрепленным ПО.

**Предмет исследования** — механическая система с большим числом степеней свободы, для определения конфигурации которой предложен расчетный алгоритм и разработана программа расчета.

**Ключевые слова:** кабель-трос, буксировка, подводный объект, течение профиля, конфигурация.

## Как цитировать

Бабанин Н.В., Мелконян А.Л. Определение конфигурации гибкого кабель-троса при буксировке подводного объекта на течении заданного профиля // Труды Санкт-Петербургского государственного морского технического университета. 2025. Т. 4, № 2. С. 153–160. DOI: 10.52899/24141437\_2025\_02\_153 EDN: KUYBNJ

Original article

DOI: [https://doi.org/10.52899/24141437\\_2025\\_02\\_153](https://doi.org/10.52899/24141437_2025_02_153)

EDN: KUYBHJ

# Defining the Flexible Electro-Mechanical Cable Configuration When Towing Underwater Vehicle in Specific Current Profile

Nikolay V. Babanin, Armen L. Melkonyan

Saint Petersburg State Marine Technical University, Saint Petersburg, Russia

## ABSTRACT

**BACKGROUND:** Research vessels are equipped with various winches designed to solve a wide range of problems. In this regard, there is a need for their design. The two most pressing real-world problems are:

1. Defining the electro-mechanical cable (EMC) configuration and the submerged depth of an underwater vehicle (UV) for a given EMC length;

2. Determining the EMC length required to ensure a given submerged UV depth.

The designs are based on the current profile and the underwater vehicle towing speed. For the initial stages (physical and mathematical models), we use a motion reversal-based approach known in ship theory, i.e. we consider the flow of liquid around the vessel rather than a vessel's motion in a liquid, to solve both problems. In this case, as UVs are towed at a constant speed, the mechanical system consisting of the EMC and the UV is a distributed-parameter system. This indicates that the system has infinite degrees of freedom. The state of equilibrium of this mechanical system is unknown and we need to determine it.

**AIM:** To calculate a flexible electro-mechanical cable (EMC) configuration when towing an underwater vehicle in a specific current profile using numerical techniques and computer technology.

The **object** is a flexible EMC with a connected UV.

The **subject** is a mechanical system with multiple degrees of freedom. Its configuration is determined by the proposed calculation algorithm and a developed calculation program.

**Keywords:** electro-mechanical cable, towing, underwater vehicle, current profile, configuration.

## To cite this article

Babanin NV, Melkonyan AL. Defining the Flexible Electro-Mechanical Cable Configuration When Towing Underwater Vehicle in Specific Current Profile. *Transactions of the Saint Petersburg State Marine Technical University*. 2025;4(2):153–160. DOI: 10.52899/24141437\_2025\_02\_153 EDN: KUYBHJ

Submitted: 19.02.2025

Accepted: 03.04.2025

Published online: 27.06.2025

## ВВЕДЕНИЕ

Проведение морских экспедиционных исследований предполагает зондирования, буксировки, работу с точными системами анализа воды на ходу судна или постановки буйковых станций. Научно-исследовательские суда оборудуются для этих целей различными лебедками. Лебедки могут быть грузоподъемные, на барабане которых размещен металлический трос, либо кабель-тросовые, позволяющие передавать на погружаемые устройства электропитание и обмениваться с ними информацией в реальном времени. Они могут быть гидравлическими, электрическими и электрогидравлическими. Существует большой парк лебедок мировых производителей [1].

Создаются и новые типы лебедок для обеспечения зондирования на заякоренных постановках [2]. Кроме того, лебедка может устанавливаться на судно самого разного водоизмещения, возможно, и не научно-исследовательское по своему основному назначению (например, рыболовецкое, судно-снабженец и т.п.). Однако в ходе выполнения авторами работы, связанной с расчетом конфигурации гибкого кабель троса при буксировке ПО, выявилась необходимость применения численных методов и ЭВМ. Численное моделирование с ЭВМ прежде всего должно быть направлено на моделирование сложных механических процессов, а не только на абстрактное решение неких уравнений. Поэтому тема является актуальной и требует нахождения пути ее решения.

**Целью исследования** является расчет конфигурации гибкого кабель-троса при буксировке подводного объекта на течении заданного профиля с помощью численных методов и ЭВМ.

Корабль буксирует подводный объект (ПО) заданной формы и отрицательной плавучести  $p_0$  на гибком кабель-тросе. Заданы характеристики кабель-троса: длина

кабель-троса  $L$ , диаметр  $d_*$ , отрицательная плавучесть погонного метра  $p_*$ . Буксировка осуществляется по прямой с постоянной скоростью  $V_k$ . Требуется определить конфигурацию кабель-троса и положение (ПО) по отношению к кораблю (рис. 1). Профиль течения (функция  $V_T(Y)$ ) и скорость буксировки  $V_k$  известны.

Для построения **физической модели** задачи воспользуемся **методом прямого конструирования** [3–6], представляя кабель-трос в виде последовательности однотипных элементов (рис. 1). При этом будем полагать, что типовой элемент модели кабель-троса состоит из абсолютно твердого стержня длины  $l$ , шарнирно прикрепленного к сфере малого (в сравнении с  $l$ ) радиуса. Отрицательная плавучесть и сопротивление воды элемента модели кабель-троса приложены в центре сферы. Однотипность элементов позволяет при записи алгоритма воспользоваться рекуррентными зависимостями, что очень удобно при организации численного расчета. Такой подход позволяет вместо механической системы с бесконечным числом степеней свободы рассматривать систему с конечным, хотя и большим, числом степеней свободы. Очевидно, что кроме элементов модели кабель-троса, общая модель задачи должна включать модель ПО [7–12].

## МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ЗАДАЧИ

Для получения системы алгебраических уравнений, описывающих состояние равновесия всех элементов принятой физической модели, рассмотрим сначала схему сил, действующих на ПО (рис. 2). Это приложенная в точке  $G$  отрицательная плавучесть  $\vec{p}_0$ , приложенная в точке  $D$  сила гидродинамического давления  $\vec{R}_0$ , а так же приложенная в точке  $O$  сила реакции со стороны первого элемента модели кабель-троса  $\vec{T}_1$  [8, 9].

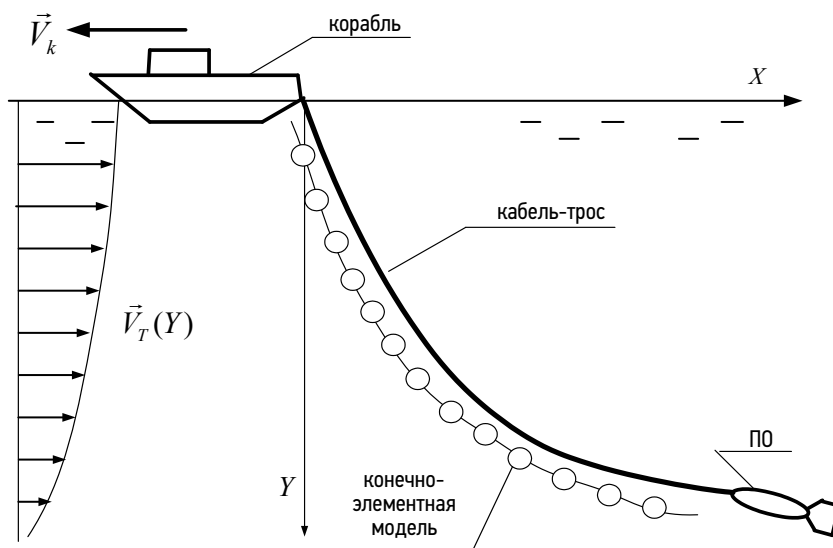


Рис. 1. Буксировка ПО на гибком кабель-тросе.

Fig. 1. Underwater vehicle towing with a flexible electro-mechanical cable.



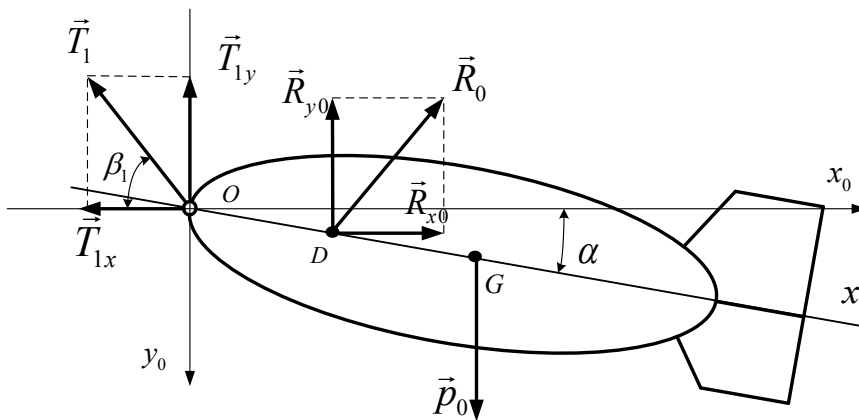


Рис. 2. Силовая схема для ПО.  
Fig. 2. Free body diagram of an underwater vehicle.

Запишем уравнения равновесия ПО [5, 6, 10]:

$$\sum F_x = 0 = R_{x0} - T_{1x} = R_{x0} - T_1 \cos \beta_1; \quad (1)$$

$$\sum F_y = 0 = p_0 - T_{1y} - R_{y0} = p_0 - T_1 \sin \beta_1 - R_{y0}; \quad (2)$$

$$\sum M_O = 0 = p_0 \cdot a \cos \alpha - R_{x0} \cdot b \sin \alpha - R_{y0} \cdot b \cos \alpha. \quad (3)$$

Дополним уравнения (3) равновесия выражениями для составляющих гидродинамической силы по [8, 9]:

$$R_{x0} = c_x(\alpha) \frac{\rho V^2}{2} d^2; R_{y0} = c_y(\alpha) \frac{\rho V^2}{2} d^2, \quad (4)$$

где \$c\_x(\alpha), c\_y(\alpha)\$ — коэффициенты сопротивления и подъемной силы (они для заданного ПО определяются экспериментально как функции угла атаки \$\alpha\$); \$b=OG\$ — расстояние до центра приложения силы гидродинамического давления; \$a=OD\$ — расстояние до центра тяжести, \$d\$ — характерный размер ПО, \$p\_0\$ — его отрицательная плавучесть.

Величины \$a, b, d, c\_x(\alpha), c\_y(\alpha), p\_0\$ — входят в состав исходных данных.

Замечание: значение скорости обтекания ПО будет

$$V = V_k + V_T(Y_0), \quad (5)$$

где \$Y\_0\$ — глубина погружения ПО.

Дополним математическую модель задачи уравнениями равновесия каждого сферического элемента кабель-троса (рис. 3):

$$\sum F_x = 0 = R + T_{ix} - T_{(i+1)x} = R + T_i \cos \beta_i - T_{i+1} \cos \beta_{i+1}; \quad (6)$$

$$\sum F_y = 0 = p - F_{apx} + T_{iy} - T_{(i+1)y} = p + T_i \sin \beta_i - T_{i+1} \sin \beta_{i+1}; \quad (7)$$

где \$R = c\_x \frac{\rho V^2}{2} S\$ — сила гидродинамического сопротивления элемента троса; \$S = d \cdot l\$ — площадь поперечного сечения элемента; \$p = p\_\* l\$ — отрицательная плавучесть элемента троса; \$l\$ — длина участка троса между сферическими элементами троса (число участков модели

кабель-троса \$n\$ задается исследователем); \$c\_x\$ — коэффициент сопротивления (задаваемый параметр, например для сферы \$c\_x=0,47\$).

Глубина погружения \$i\$-го элемента модели кабель-троса определяется координатой \$Y\_i\$

$$Y_i = H - l \sum_{j=1}^i \sin \beta_j. \quad (8)$$

Замечание: значение скорости обтекания \$i\$-го шара будет

$$V = V_k + V_T(Y_i). \quad (9)$$

Расстояние по горизонтали от ПО до \$i\$-ой сферы определяется по формуле:

$$\tilde{X}_{НПА} = l \sum_{j=1}^i \cos \beta_j. \quad (10)$$

Подсистема уравнений (6)–(11) верна для \$n\$ элементов модели кабель-троса; сумма длин участков позволит найти общую длину кабель-троса как

$$L = nl. \quad (11)$$

Совокупность записанных уравнений, часть из которых трансцендентные, содержащие слагаемые, зависящие от заранее неизвестных заглублений элементов модели, является математической моделью рассматриваемой задачи.

## АЛГОРИТМ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ

### Постановка первой задачи

Для построения алгоритма расчета воспользуемся *методом последовательных приближений* [3, 13, 14]. В начале первого приближения зададим \$Y\_0\$ — глубина погружения ПО. Заметим, что в этом случае уравнения (1)–(5) представляют собой независимую систему уравнений. При этом можно начать с решения трансцендентного

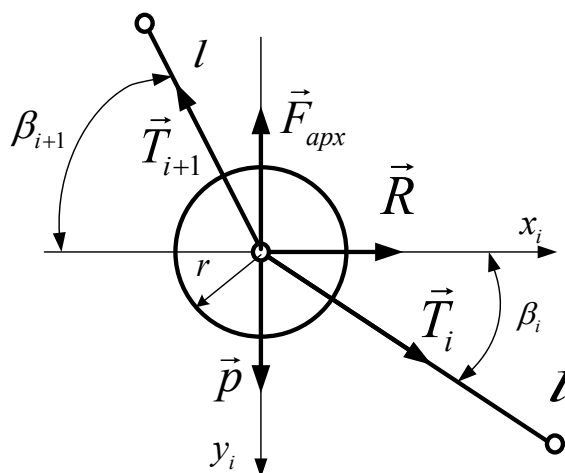


Рис. 3. Силовая схема конечного элемента троса.  
Fig. 3. Free body diagram of the finite cable element.

уравнения (3) при условиях (4) и (5). Его решение вновь воспользуемся **методом последовательных приближений**. Для этого вычислим сумму моментов относительно точки  $O$  всех действующих на ПО сил при пошаговом увеличении угла атаки  $\alpha$  от нуля градусов; смена знака суммы будет свидетельствовать о достижении значения  $\alpha$ , при котором имеет место равновесие ПО. После этого уравнения (1) и (2) позволят при численном расчете найти силу реакции от первого элемента модели троса  $T_1$ , а также угол ее с горизонтом  $\beta_1$  (т.е. положение первого от ПО конечного элемента троса).

Рекуррентные формулы (6)–(10) позволяют последовательно находить значения силы реакции последующего элемента модели троса  $T_{i+1}$ , угол ее с горизонтом  $\beta_{i+1}$ , координаты сферических элементов  $Y_{i+1}$  и  $X_{i+1}$  (т.е. конфигурацию модели кабель-троса). Расчет первого приближения заканчивается, когда выполняется уравнение (11). Если в результате расчета последний сферический элемент оказался над поверхностью воды (т.е.  $Y_n < 0$ ), начальную глубину погружения ПО следует увеличить; если последний элемент оказался на глубине, превышающей наперед заданную погрешность расчета, начальную глубину ПО следует уменьшить. Расчеты приближений следует выполнять до тех пор, пока последний сферический элемент модели не достигнет поверхности воды с наперед заданной точностью.

Предложенный алгоритм нахождения решения нелинейной задачи базируется на последовательном решении ряда однотипных линейных задач (системы линейных уравнений с вычисляемыми на каждом шаге силами сопротивления) и использовании рекуррентных выражений для определения длины и конфигурации кабель-троса с контролем выполнения критерия окончания расчета (достижение концом троса поверхности воды).

### Постановка второй задачи

Корабль буксирует ПО заданной формы и отрицательной плавучести  $p_0$  на гибком кабель-тросе. Заданы характеристики кабель-троса: диаметр  $d_*$ , отрицательная плавучесть погонного метра  $p_*$ . Буксировка осуществляется по прямой с постоянной скоростью  $V_k$  с глубиной  $H$  погружения ПО. Требуется определить необходимую длину кабель-троса, его конфигурацию и положение ПО по отношению к кораблю (см. рис. 1). Профиль течения (функция  $V_T(Y)$ ) и скорость буксировки  $V_k$  известны.

Предложенные выше физическая и математическая модели, а также алгоритм расчета могут быть применены и для решения второй задачи. В этом случае метод последовательных приближений будет использован только для определения угла атаки ПО и силы реакции со стороны первого элемента модели кабель-троса. Далее применяется последовательное решение уравнений (6)–(10) с контролем глубины погружения  $Y_{i+1}$  сферического элемента модели кабель-троса. Как только эта величина станет меньше или равной наперед заданной, расчет прекращается, а требуемая длина кабель-троса рассчитывается как произведение длины элемента модели  $l$  на число элементов.

**Примечание:** длина элемента модели  $l$  определяется опытом и (или) представлениями исследователя о моделируемом процессе (например, предполагаемой длиной кабель-троса и примерным количеством элементов, которые могут дать хорошее приближение модели к реальному объекту). Один расчет дает ответ на вопрос «что будет, если...». Осуществив несколько расчетов с разной длиной участка (т.е. выполнив численный эксперимент) можно определить оптимальное значение числа конечных элементов (когда увеличение числа элементов физической модели перестает влиять на результаты расчета).

Таблица 1. Исходные данные для расчета первой задачи

Table 1. Calculation inputs for the first problem

$a, \text{ м}$	$b, \text{ м}$	$d, \text{ м}$	$P_0, \text{ Н}$	$\rho, \text{ Н}$	$L, \text{ м}$	$D_{gr}, \text{ м}$
1	0,65	0,35	1000	30	300	0,02

## Результаты расчета первой задачи

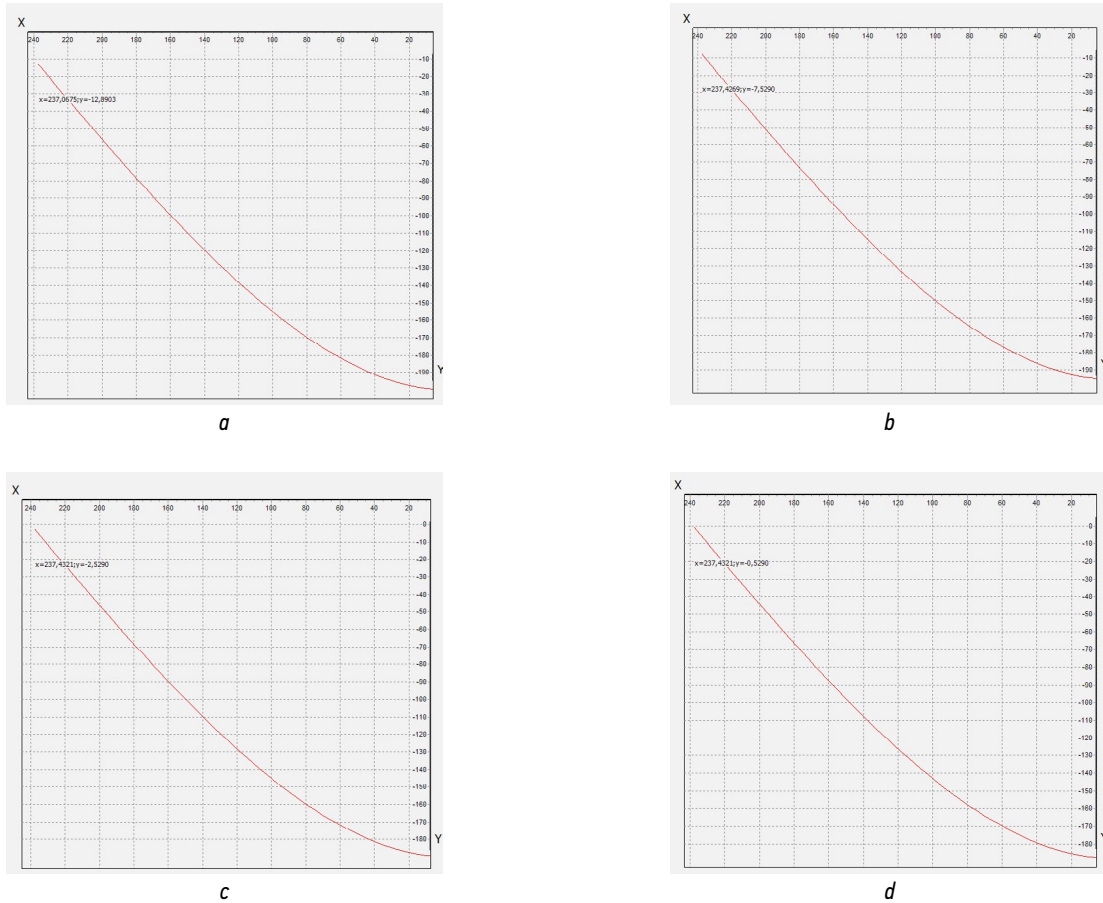


Рис. 4. Конфигурация кабель-троса при постоянных скоростях буксировки и течения. *a* — расчет с начальной глубиной  $Y_0=200$  до поверхности 12,89 м, *b* — расчет с начальной глубиной  $Y_0=195$  до поверхности 7,53 м, *c* — расчет с начальной глубиной  $Y_0=190$  до поверхности 2,53 м, *d* — расчет с начальной глубиной  $Y_0=188$  до поверхности 0,52 м.

Fig. 4. Electro-mechanical cable configuration for constant towing and current speeds. *a*, calculation for initial depth  $Y_0=200$  to surface (12.89 m); *b*, calculation for initial depth  $Y_0=195$  to surface (7.53 m); *c*, calculation for initial depth  $Y_0=190$  to surface (2.53 m); *d*, calculation for initial depth  $Y_0=188$  to surface (0.52 m).

Таблица 2. Исходные данные для расчета второй задачи

Table 2. Calculation inputs for the second problem

$a, \text{ м}$	$b, \text{ м}$	$d, \text{ м}$	$P_0, \text{ Н}$	$\rho, \text{ Н}$	$l, \text{ м}$	$H, \text{ м}$	$D_{gr}, \text{ м}$
1	0,65	0,35	1000	15	10	600	0,02

## ВЫВОДЫ

**Задача 1.** Расчет первого приближения заканчивается, когда выполняется уравнение (11). По исходным данным в табл. 1 в результате расчета последний сферический элемент оказался ниже уровня поверхностью воды (т.е.  $y < 0$ ), при этом начальная глубина составила

$Y_0=200$  м, а до поверхности воды последнего элемента 12,89 м. Расчеты приближений выполнялись до тех пор, пока последний сферический элемент модели не достигнет поверхности воды с наперед заданной точностью в 1 м. Расчет был остановлен при начальной глубине (рис. 4, *d*)  $Y_0=188$  м; при этом последний конечный элемент троса не достиг поверхности воды 0,52 м.

## Результаты расчета второй задачи

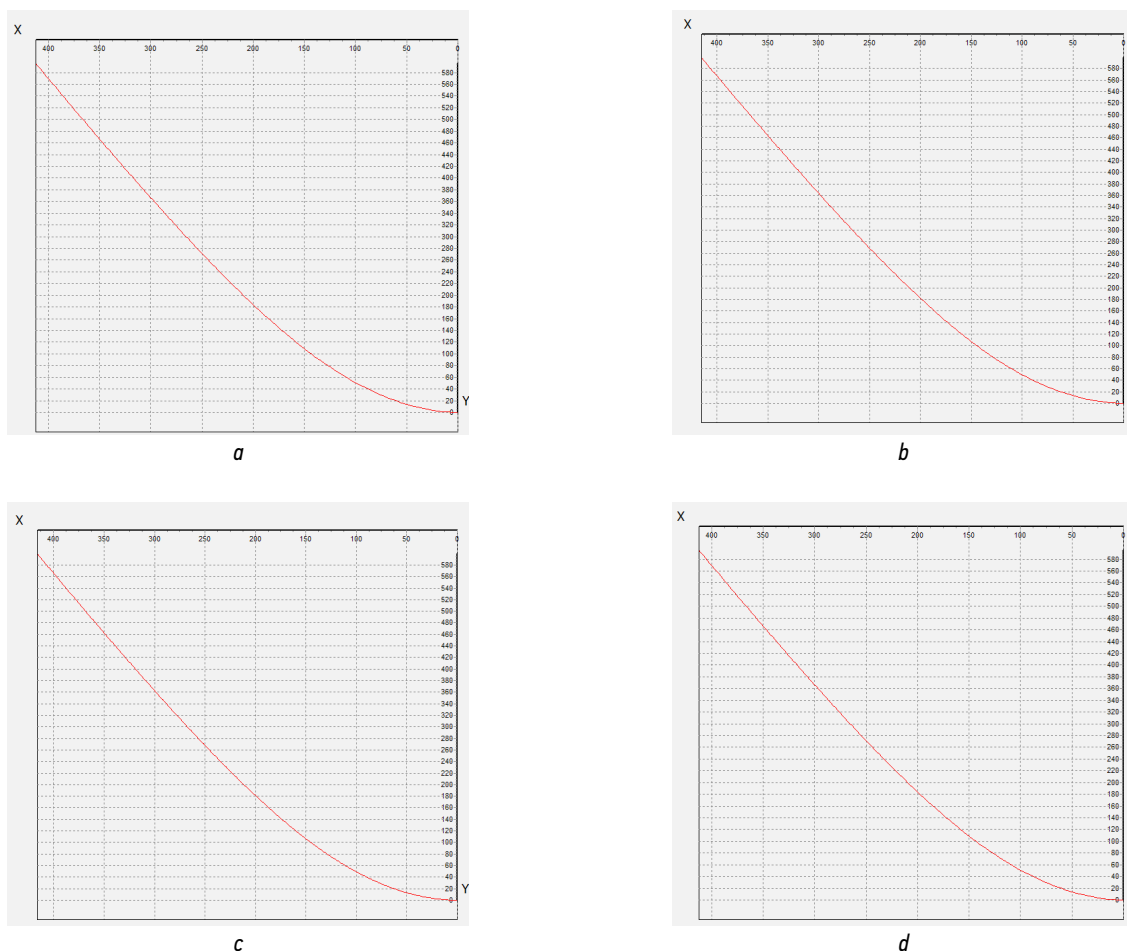


Рис. 5. Конфигурация кабель-троса. *a* — Расчет с длиной участка  $l=5$  м, *b* — расчет с длиной участка  $l=2,5$  м, *c* — расчет с длиной участка  $l=1,25$  м, *d* — расчет с длиной участка  $l=0,625$  м.

Fig. 5. Electro-mechanical cable configuration. *a*, calculation for section length  $l=5$  m; *b*, calculation for section length  $l=2.5$  m; *c*, calculation for section length  $l=1.25$  m; *d*, calculation for section length  $l=0.625$  m.

**Задача 2.** По исходным данным в табл. 2 осуществив несколько расчетов с разной длиной участка (рис. 5), было определено оптимальные значения числа конечных элементов (когда увеличение числа элементов физической модели перестает влиять на результаты расчета). Для предложенных исходных данных значение  $l$  составило в диапазоне от 1 до 5 м.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработанные модель и программы расчета определения конфигурации гибкого кабель-троса при буксировке подводного объекта на течении заданного профиля, позволяют решить две задачи: в первой из них можно при заданной длине кабель-троса определить его конфигурацию, а также заглубление подводного объекта (ПО), во второй задаче можно определить длину кабель-троса, обеспечивающую заданное заглубление ПО. При этом профиль течения и скорость буксировки ПО должны быть заданы.

## ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ИНФОРМАЦИЯ

**Вклад авторов.** Все авторы внесли существенный вклад в разработку концепции, проведение исследования и подготовку статьи, прочли и одобрили финальную версию перед публикацией. Личный вклад каждого автора: Н.В. Бабанин — участие в разработке физической и математической моделей задач и алгоритмов расчета, разработка программного обеспечения для электронно-вычислительных машин, базирующегося на теории расчета конфигурации кабельно-тросовых систем с применением специализированных программных инструментов «delphi7»; А.Л. Мелконян — предложение физической и математической моделей задач, предложение алгоритмов расчета, участие в отладке программы для проверки результатов.

**Источники финансирования.** Авторы заявляют об отсутствии внешнего финансирования при проведении исследования.

**Конфликт интересов.** Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией настоящей статьи.

## ADDITIONAL INFO

**Author contributions:** N.V. Babanin: participation in the development of physical and mathematical models of tasks and calculation algorithms, development of software for electronic computers based on the theory

of calculating the configuration of cable systems using specialized software tools (Delphi 7); A.L. Melkonyan: proposal of physical and mathematical models of tasks, proposal of calculation algorithms, validation.

**Funding sources:** The study was not supported by any external sources.  
**Disclosure of interests:** The authors have no explicit or potential conflicts of interests associated with the publication of this article.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Левашов Д.Е. Техника экспедиционных исследований: Инструментальные методы и технические средства оценки промыслово-значимых факторов среды. М.: ВНИРО, 2003. ISBN: 5-85382-289-6 EDN: HVJRKX
2. Баранов В.И., Зинченко А.Б., Зацепин А.Г. и др. Подводная стационарная система сканирования толщи воды. В кн.: Материалы XV Всероссийской научно-технической конференции «МСОИ-2017»: в 2 т.: сб. ст. М.: АПР, 2017. Т. 1. С. 126–129. EDN: YSGYST
3. Чувиковский В.С. Численные методы в строительной механике корабля. Л.: Судостроение, 1976.
4. Плотников А.М., Чувиковский В.С. Численные методы и ЭВМ в механике для судостроителей. Л.: ЛКИ, 1987.
5. Плотников А. М., Чувиковский В.С. Численные методы и ЭВМ в механике для судостроителей. Л.: ЛКИ, 1988.
6. Бабанин Н.В., Мелконян А.Л., Титова Ю.Ф. Особенности построения математических моделей и алгоритмов расчета параметров движения и равновесия // Труды СПбГМТУ. 2023. Т. 1, № 5. С. 76–98. DOI: 10.52899/24141437\_2023\_01\_76 EDN: CPLSKZ
7. Войткунский Я.И., Першиц Р.Я., Титов И.А. Справочник по теории корабля. Ленинград: СудПромГиз, 1960.
8. Пантов Е.Н., Махин Н.Н., Шереметов Б.Б. Основы теории движение подводных аппаратов. Л.: Судостроение, 1973.
9. Рождественский В.В. Динамика подводной лодки. Л.: Судостроение, 1970.
10. Бутенин Н.В., Лунц Я.Л., Меркин Д.Р. Курс теоретической механики. В 2 т. М.: Наука, 1970.
11. Кулеш Ю.Н., Мелконян А. Л., Рошанский В.И., Скворцов В.Я. Решение учебно-исследовательских задач статики в судостроении (с использованием численных методов и ЭВМ). Л.: ЛКИ, 1988.
12. Кулеш Ю.Н., Мелконян А.Л., Скворцов В.Я. Учебно-исследовательские задачи пространственной статики в судостроении (с использованием ЭВМ). Л.: ЛКИ, 1989.
13. Корн Г., Корн Т. Справочник по математике для научных работников и инженеров. М.: Наука, 1984.
14. Верховодко А.З., Матлах А.П., Мелконян А.Л. Методические указания к демонстрационным лабораторным работам с применением ЭВМ по курсу теоретической механики. Л.: ЛКИ, 1989.

## REFERENCES

1. Levashov DE. *Expeditionary research techniques: Instrumental methods and technical means for assessing commercially significant environmental factors*. Moscow: VNIRO; 2003. (In Russ.) ISBN: 5-85382-289-6 EDN: HVJRKX
2. Baranov VI, Zinchenko AB, Zatsepin AG, et al. Underwater stationary system for scanning the water column. In: *Proceedings of the XV All-Russian Scientific and Technical Conference "MSOI-2017": in 2 volumes: Coll. Papers*. Moscow: APR; 2017;1:126–129. (In Russ.) EDN: YSGYST
3. Chuvikovskiy VS. *Numerical methods in ship structural mechanics*. Leningrad: Sudostroenie; 1976. (In Russ.)
4. Plotnikov AM, Chuvikovskiy V. *Numerical methods and computers in mechanics for shipbuilders*. Leningrad: LKI; 1987. (In Russ.)
5. Plotnikov AM, Chuvikovskiy VS. *Numerical methods and computers in mechanics for shipbuilders*. Leningrad: LKI; 1988. (In Russ.)
6. Babanin NV, Melkonyan AL, Titova YuF. Features of constructing mathematical models and algorithms for calculating the parameters of motion and equilibrium. *Proceedings of SPbGMTU*. 2023;1(5):76–98. (In Russ.) DOI: 10.52899/24141437\_2023\_01\_76 EDN: CPLSKZ
7. Voitkunskiy YaI, Pershits RYa, Titov IA. *Handbook of ship theory*. Leningrad: SudPromGiz; 1960. (In Russ.)
8. Pantov EN, Makhin NN, Sheremetov BB. *Fundamentals of the theory of movement of underwater vehicles*. Leningrad: Sudostroenie; 1973. (In Russ.)
9. Rozhdestvensky VV. *Dynamics of a submarine*. Leningrad: Sudostroenie; 1970. (In Russ.)
10. Butenin NV, Lunts YaL, Merkin DR. *Course of theoretical mechanics*. In 2 volumes. Moscow: Nauka; 1970. (In Russ.)
11. Kulesh YuN, Melkonyan AL, Roshchansky VI, Skvortsov VYa. *Solution of educational and research problems of statics in shipbuilding (using numerical methods and computers)*. Leningrad: LKI; 1988. (In Russ.)
12. Kulesh YuN, Melkonyan AL, Skvortsov VYa. *Educational and research problems of spatial statics in shipbuilding (using computers)*. Leningrad: LKI; 1989. (In Russ.)
13. Korn G, Korn T. *Handbook of mathematics for scientists and engineers*. Moscow: Nauka; 1984. (In Russ.)
14. Verkhovodko AZ, Matlakh AP, Melkonyan AL. *Methodical instructions for demonstration laboratory work using a computer in the course of theoretical mechanics*. Leningrad: LKI; 1989. (In Russ.)

## ОБ АВТОРАХ

\***Николай Викторович Бабанин**, канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры теоретической механики и сопротивления материалов, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет; адрес: 190121, Санкт-Петербург, ул. Лощманская, 3; ORCID: 0000-0003-2804-741X; eLibrary SPIN: 5412-4309; e-mail: nikolai-babanin@mail.ru

**Армен Левонич Мелконян**, канд. техн. наук, доцент, профессор кафедры теоретической механики и сопротивления материалов, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет; e-mail: mel1950@mail.ru

## AUTHORS' INFO

\***Nikolay V. Babanin**, Cand. Sci. (Engineering), Associate Professor, Professor of Theoretical Mechanics and Material Strength Department, Saint Petersburg State Marine Technical University; address: 3, Lotsmanskaya str., 190121 St. Petersburg, Russia; ORCID: 0000-0003-2804-741X; eLibrary SPIN: 5412-4309; e-mail: nikolai-babanin@mail.ru

**Armen L. Melkonian**, Cand. Sci. (Engineering), Associate Professor, Professor of Theoretical Mechanics and Material Strength Department, Saint Petersburg State Marine Technical University; e-mail: mel1950@mail.ru

\* Автор, ответственный за переписку / Corresponding author

Оригинальное исследование

УДК 667.622.1

DOI: [https://doi.org/10.52899/24141437\\_2025\\_02\\_161](https://doi.org/10.52899/24141437_2025_02_161)

EDN: CTNHLX

# Исследование антикоррозионных свойств эпоксидного покрытия, армированного графеном

А.В. Иванов<sup>1</sup>, Т.Р. Майгельдинов<sup>2</sup>, В.В. Ваганов<sup>2</sup><sup>1</sup> Санкт-Петербургский государственный морской технический университет, Санкт-Петербург, Россия;<sup>2</sup> Санкт-Петербургский государственный политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург, Россия

## АННОТАЦИЯ

**Актуальность.** Развитие антикоррозионных покрытий для морского судостроения остается важной задачей из-за агрессивного воздействия соленой воды и атмосферных факторов. Традиционные эпоксидные покрытия обладают хорошей адгезией и химической стойкостью, но их защитные свойства могут быть улучшены за счет модификации наноматериалами. Графен, благодаря уникальной структуре и барьерным свойствам, представляет собой перспективную добавку для повышения коррозионной стойкости и механической прочности полимерных покрытий.

**Цель работы.** Исследование направлено на изучение влияния графенового порошка на структуру, антикоррозионные свойства и адгезионную прочность эпоксидных покрытий. Особое внимание уделено оптимизации концентрации графена для достижения максимального защитного эффекта.

**Материалы и методы.** Графеновый порошок был получен методом жидкофазного отслаивания графита с последующей сублимационной сушкой, что позволило сохранить его структуру. Эпоксидные покрытия модифицировали графеном в концентрациях 0,0125, 0,025 и 0,05 мас. %. Для оценки защитных свойств проводились испытания в камере солевого тумана, а структура покрытий анализировалась с помощью микроскопических методов.

**Результаты.** Эксперименты показали, что введение графена снижает количество поверхностных микропор и улучшает структуру покрытия. Наибольшая коррозионная стойкость достигнута при содержании графена 0,025 мас. %, что связано с его равномерной дисперсией в полимерной матрице и эффективным взаимодействием с эпоксидным связующим.

**Заключение.** Исследование подтвердило, что добавление графена в эпоксидные покрытия значительно повышает их антикоррозионные свойства и адгезионную прочность. Оптимальная концентрация графена (0,025 мас. %) позволяет создавать материалы, перспективные для применения в морском судостроении и других областях, требующих повышенной защиты от коррозии.

**Ключевые слова:** графен; эпоксидное порошковое покрытие; антикоррозионное покрытие; прочность сцепления; наночастица.

## Как цитировать

Иванов А.В., Майгельдинов Т.Р., Ваганов В.В. Исследование антикоррозионных свойств эпоксидного покрытия, армированного графеном // Труды Санкт-Петербургского государственного морского технического университета. 2025. Т. 4, № 2. С. 161–168. DOI: 10.52899/24141437\_2025\_02\_161 EDN: CTNHLX

Original study article

DOI: [https://doi.org/10.52899/24141437\\_2025\\_02\\_161](https://doi.org/10.52899/24141437_2025_02_161)

EDN: CTNHLX

# Corrosion-Resisting Properties of Graphene-Reinforced Epoxy Coating

Alexander V. Ivanov<sup>1</sup>, Timur R. Maigeldinov<sup>2</sup>, Vyacheslav V. Vaganov<sup>2</sup><sup>1</sup> Saint Petersburg State Maritime Technical University, Saint Petersburg, Russia;<sup>2</sup> Peter the Great St. Petersburg State Polytechnic University, Saint Petersburg, Russia

## ABSTRACT

**BACKGROUND:** The development of anti-corrosion coatings for marine applications is still important due to corrosion caused by salt water and weather factors. Conventional epoxy coatings have good adhesion and chemical resistance, but their protective properties can be improved by nano-based modification. Due to its unique structure and barrier properties, graphene is a promising additive to increase the corrosion resistance and mechanical strength of polymer coatings.

**AIM:** This study aims to investigate the influence of graphene powder on the structure, corrosion resistance properties, and adhesive strength of epoxy coatings. It is focused on optimization of graphene concentration to achieve the best possible protective effect.

**METHODS:** Graphene powder was produced by liquid-phase exfoliation of graphite followed by its sublimation dehydration allowing to preserve its structure. Epoxy coatings were modified with 0.0125, 0.025 and 0.05 wt% of graphene. To determine the protective properties, the coatings were tested in a salt spray chamber; the coating structure was analyzed using microscopic methods.

**RESULTS:** Experiments showed that the introduced graphene reduces the number of surface micropores and improves the coating structure. The highest corrosion resistance was achieved with graphene concentration of 0.025 wt%, which is associated with its uniform dispersion in the polymer matrix and effective interaction with the epoxy binder.

**CONCLUSION:** The study showed that adding graphene to epoxy coatings significantly improves their corrosion-resisting properties and adhesive strength. The optimum concentration of graphene (0.025 wt%) allows to create promising materials for marine shipbuilding and other applications requiring increased corrosion protection.

**Keywords:** graphene; epoxy powder coating; anti-corrosion coating; adhesion strength; nanoparticle.

## To cite this article

Ivanov AV, Maigeldinov TR, Vaganov VV. Corrosion-Resisting Properties of Graphene-Reinforced Epoxy Coating. *Transactions of the Saint Petersburg State Marine Technical University*. 2025;4(2):161–168. DOI: [10.52899/24141437\\_2025\\_02\\_161](https://doi.org/10.52899/24141437_2025_02_161) EDN: CTNHLX

Submitted: 03.04.2025

Accepted: 05.05.2025

Published online: 20.06.2025

## ВВЕДЕНИЕ

Коррозия металлов ежегодно наносит ущерб экономике, а также инфраструктуре, что приводит к тому, что научное сообщество разрабатывает и совершенствует методы защиты металлов от этого деструктивного процесса. Особую актуальность эта проблема приобретает в отрасли, где металлоконструкции подвергаются длительному воздействию агрессивных факторов климата, таких как влажность и экстремальные температуры. Например, в морском судостроении повышение износоустойчивости и коррозионной стойкости является одной из главных задач, а именно необходимостью эксплуатации судов в условиях северных широт, где к стандартным коррозионным процессам приводит воздействие низких температур.

На сегодняшний день одной из наиболее простых и доступных технологий создания металлических конструкций из металла является барьерное покрытие, которое изолирует поверхность металла от внешней среды. В широком диапазоне методов защиты органические покрытия достигаются благодаря своей гибкости, универсальности и, возможно, тонким свойствам их свойств в определенных условиях эксплуатации. Такие покрытия могут использоваться в различных понятиях, включая морскую, строительную, автомобильную и авиационную отрасли, что делает их универсальным методом для распространения.

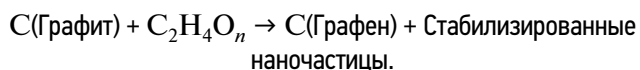
Среди различных полимеров для органических покрытий эпоксидные смолы, разновидность термоактивных полимеров, выделяются своей технологичностью, исключительной механической прочностью и высокой адгезионной прочностью [1]. Однако эксплуатационные характеристики эпоксидных антикоррозионных покрытий всегда снижаются из-за присущих им недостатков, поскольку неполная сшивка между молекулами эпоксидной смолы и отвердителя в сочетании с низкой устойчивостью к распространению трещин всегда вызывают структурные дефекты, такие как поры, полости и трещины в матрице покрытия, образуя пути диффузии агрессивных сред к металлу, что создает серьезную проблему для эпоксидных покрытий, обеспечивающих долговременную защиту от коррозии. С этой целью добавление нанонаполнителей оказывается эффективным для улучшения антикоррозионных характеристик [2]. Таким образом, комбинирование традиционных эпоксидных материалов с нанотехнологиями открывает перспективы для создания более эффективных защитных систем. Это направление уже сейчас активно развивается, предлагая решения для самых сложных задач, связанных с защитой металлов от коррозии, и предполагает ещё больший прогресс в будущем, что позволит значительно снизить материальные и экологические потери от коррозии.

## ОПИСАНИЕ ПОЛУЧЕНИЯ ГРАФЕНА

Углеродные наноматериалы, такие как фуллерены, углеродные нанотрубки и графен, благодаря своей уникальной атомарной стадии и физико-химическим свойствам, становятся все более популярными в качестве компонентов для модификации нанокompозитов. Их основные преимущества включают большую площадь поверхности, механическую прочность, легкость, а также способность взаимодействовать с полимерными матрицами на молекулярном уровне. Одним из наиболее важных свойств этих наноматериалов является их способность улучшать свойства материалов даже при низком энергопотреблении (менее 1 мас. %), что позволяет сохранять легкую прочность конечного материала и минимизировать негативное влияние [3].

Графен, как один из представителей углеродных наноматериалов, выделяется среди других благодаря своей двумерной плоской стадии, которая придает ему уникальные свойства. Высокая механическая прочность, достигаемая показателей порядка 130 ГПа, большая площадь поверхности (до 2630 м<sup>2</sup>/г), отличная теплопроводность и электрическая проводимость делают графен универсальным нанонаполнителем для создания высокоэффективных композитов. Особенно важны его функции в открытой атмосфере, где графеновые свойства позволяют создавать физический барьер и обеспечивают извилистость путей диффузии агрессивных сред, таких как кислород, влага и ионы хлора. Эти свойства значительно повышают характеристики покрытий, что приводит к коррозионным процессам и снижению рисков.

В данном исследовании выбран экологически чистый метод получения графена путем отслаивания графита в водно-этанольном растворе поливинилового спирта (ПВС), где молекулы ПВС были адсорбированы на графене, чтобы действовать как стабилизаторы против агломерации за счет пространственного отталкивания. Процесс можно описать следующей реакцией:



Были исследованы антикоррозионные свойства, а также адгезионная прочность готовых покрытий, результаты показали, что очень небольшое добавление 0,025 мас. % графена значительно улучшило коррозионную стойкость, а также адгезионную прочность эпоксидного порошкового покрытия.

## РАСЧЕТНО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОНЦЕНТРАЦИЙ ГРАФЕНА В ПОРОШКОВОМ ПОКРЫТИИ

Подложки из стальной пластины были обезжирены спиртом для удаления загрязнений и масел с поверхности. Подготовленный порошок графена был равномерно



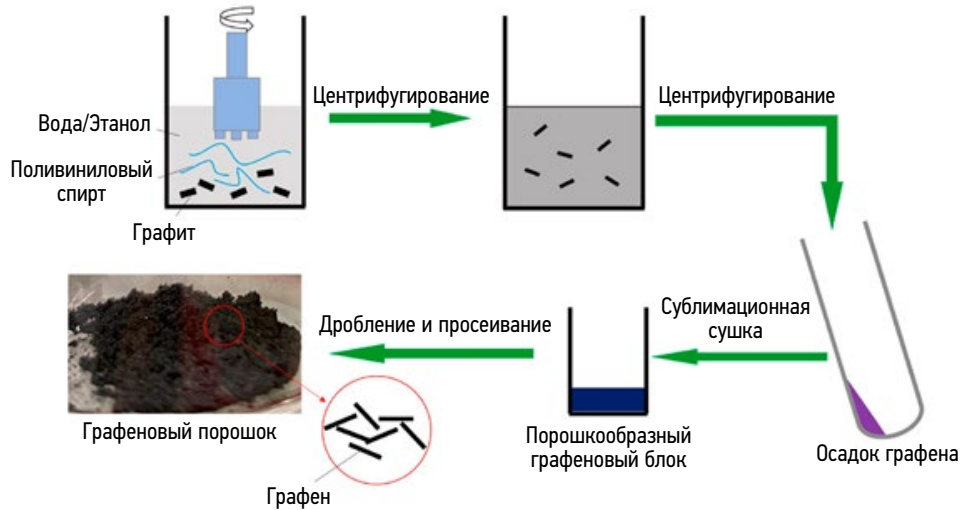


Рис. 1. Изготовление графенового порошка.  
Fig. 1. Production of graphene powder.

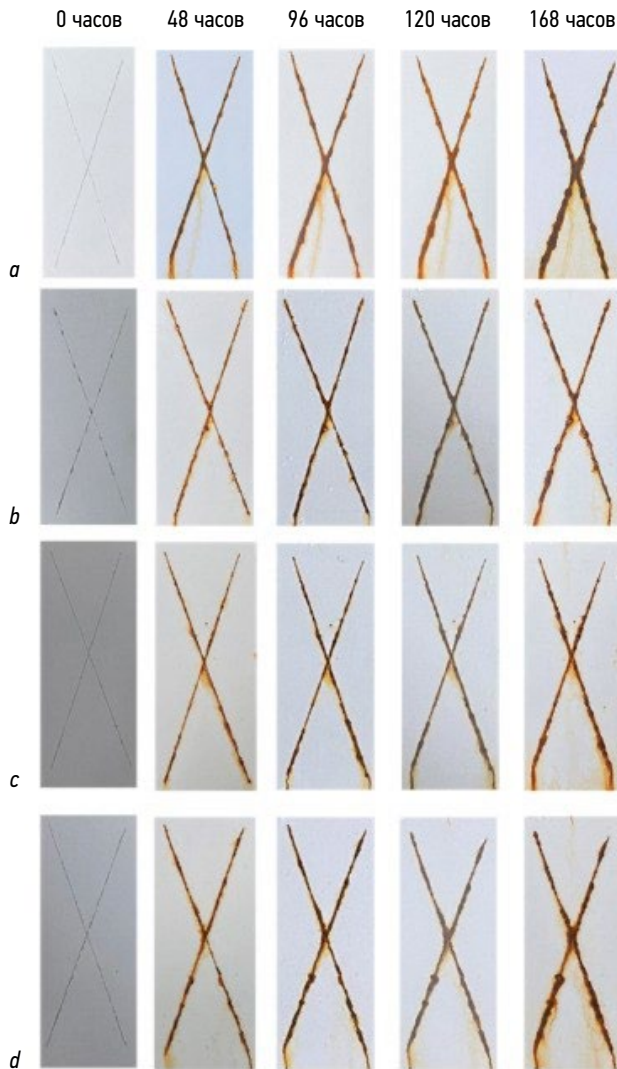


Рис. 2. Фотографии образцов (a) EP, (b) Gr<sub>0,0125%</sub>/EP, (c) Gr<sub>0,025%</sub>/EP и (d) Gr<sub>0,05%</sub>/EP при испытании в солевом тумане в течение разных часов.

Fig. 2. Photographs of samples (a) EP; (b) Gr<sub>0.0125%</sub>/EP; (c) Gr<sub>0.025%</sub>/EP, and (d) Gr<sub>0.05%</sub>/EP tested by salt spray with different test duration.

смешан с эпоксидным порошком путем механического перемешивания. После этого однородная порошковая смесь была нанесена на поверхность стальной пластины посредством электростатического распыления с последующим отверждением в печи при 180 °C в течение 10 минут. Чистое эпоксидное порошковое покрытие и эпоксидные порошковые покрытия, содержащие 0,0125, 0,025 и 0,05 мас. % графенового порошка, были сокращенно обозначены как EP, Gr<sub>0,0125%</sub>/EP, Gr<sub>0,025%</sub>/EP, Gr<sub>0,05%</sub>/EP соответственно.

В качестве метода оценки процесса коррозии стальных подложек, защищенных покрытиями в чрезвычайно суровых условиях, было проведено испытание в солевом тумане, при котором все образцы покрытия были поцарапаны и помещены в 5%-ный раствор NaCl в солевом тестере [4]. Были зафиксированы условия коррозии различных образцов покрытия после нескольких часов, и фотографии показаны на рис. 2. В поцарапанной области покрытия стальная подложка подвергалась воздействию коррозионной среды, где коррозионные агенты могли быстро достичь подложки, инициируя процесс коррозии. Между тем, коррозионные агенты в поцарапанной и открытой области будут диффундировать вдоль интерфейса покрытие-металл в области с обеих сторон под покрытием, которые затем также будут подвергаться коррозии, вызывая накопление большего количества продуктов коррозии в царапинах. В результате все образцы были заржавевшими в царапинах после помещения в испытательную установку для солевого тумана на 48, 96, 120 и 168 часов, в то время как образец EP более явно заржавел в царапине и представлял собой кучу ржавчины, накапливающуюся особенно после 168 часов воздействия, сообщая, что стальная подложка под покрытием была сильно корродирована из-за слабой коррозионной стойкости. Результат испытания в солевом тумане показал, что графен улучшил барьерные свойства покрытия не только для защиты от коррозионных агентов

от металлической подложки, но и для замедления распространения коррозии вдоль интерфейса покрытие-металл, а покрытие Gr<sub>0,025%</sub>/EP с меньшим количеством продуктов коррозии в царапине по сравнению с другими образцами покрытий показало его самые высокие барьерные свойства для защиты от коррозии.

## АДГЕЗИОННЫЕ СВОЙСТВА

Высокая прочность сцепления с металлической подложкой остается одним из традиционных свойств, определяющих способность покрытия обеспечивать длительную и надёжную защиту от агрессивных сред. Адгезионная прочность рассчитывается по формуле:

$$\sigma_{\text{адг}} = \frac{F_{\text{отрыв}}}{A_{\text{контакт}}},$$

где  $\sigma_{\text{адг}}$  — адгезионная прочность,  $F_{\text{отрыв}}$  — сила отрыва,  $A_{\text{контакт}}$  — площадь контакта.

Долговечность покрытия зависит от его способности прочно удерживаться на подложке, подвергаться механическим нагрузкам и предотвращать образование пустот или трещин, способствующих проникновению агрессивных агентов. Именно поэтому исследования, направленные на изучение и улучшение адгезионных характеристик покрытий, играют главную роль в разработке современных защитных материалов.

В данном случае прочность сцепления различных типов покрытий с металлической подложкой измерялась с использованием метода испытаний на отрыв. В начальных испытаниях, где покрытия были проанализированы в исходном, нетронутым состоянии, все покрытия включали чистое эпоксидное покрытие (EP) и модифицированные графеном покрытия (Gr 0,0125 % /EP, Gr 0,025 % /EP, Gr 0,05 % /EP), продемонстрированы общие показатели прочности сцепления, достигавшие порядка 4 МПа,

как показано на рис. 3, а. Эти результаты соответствуют высоким адгезионным характеристикам эпоксидных смол, которые обуславливают их химический климат. Эпоксидные смолы содержат активные полярные группы, способные образовывать прочные химические вещества и физические связи с металлической подложкой, что обеспечивает эффективное прилипание покрытия к субстрату.

Однако, как показано на рис. 3, б затронутая динамика сцепления значительно изменилась при испытаниях в условиях, моделирующих воздействие агрессивной среды. Для изучения поведения покрытого долгого контакта с коррозионными агентами все переносились в камеру с повторным соляным туманом в течение 240 часов, после чего проводится тест на отрыв. В этих условиях была обнаружена разница в степени ослабления и сохранения адгезионной прочности в различных образцах [5].

Наибольшую степень повреждения показало чистое эпоксидное покрытие (EP). После воздействия в условиях соляного тумана его адгезионная прочность заметно снизилась, площадь отслоения от подложки увеличилась. Результатом такого воздействия является ослабление структуры покрытия из-за проникновения солевого раствора по путям, образовавшимся в микродефектах, трещинах и порах, неизбежно возникающих в процессе эксплуатации. Слабая барьерная защита покрытия EP привела к быстрому повреждению интерфейса «покрытие-металл», что, в свою очередь, вызвало интенсивное разрушение в зоне контакта с металлической подложкой [6].

В отличие от чистого эпоксидного покрытия, покрытия, модифицированные графеном, показали лучшие характеристики. Графен, благодаря двумерной площади и высокой площади, включает функцию армирования наполнителя, которая усиливает адгезионные и барьерные свойства покрытия. Особенно выделяется образец Gr 0,025 %/EP, который показал значительную адгезионную прочность даже после 240 часов воздействия

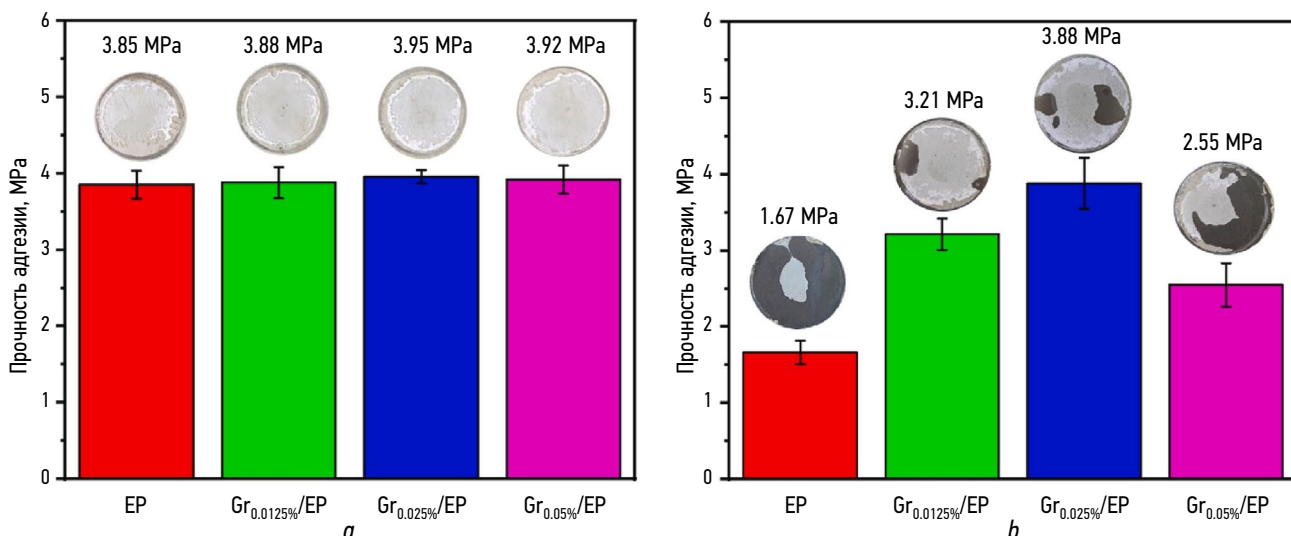


Рис. 3. Прочность сцепления и фотографии образцов покрытий после испытания на отрыв (а) до и (б) после испытания в соляном тумане в течение 240 ч.

Fig. 3. Adhesion strength and photographs of coating samples after peel test (a) before and (b) after 240-hour salt spray test.

агрессивной среды. Его прочность сцепления составила 3,88 МПа, что практически сравнимо с показателями исходного состояния покрытия. Небольшое снижение адгезионных характеристик сопровождалось умеренной степенью отслоения, что свидетельствует о лучшей стойкости данных покрытий к воздействию.

Успешные результаты покрытия Gr 0,025 % /EP объясняются ограничением содержания графенового порошка, что обеспечивает максимальный эффект структуры покрытия, не нарушая его технологические характеристики [7]. Частицы графена, распределённые в полимерной матрице, образуют трещину и минимизируют проникновение агрессивных веществ в подложку. Благодаря этим свойствам графен также обеспечивает более равномерное распределение напряжений на границах «металлического покрытия», предотвращающее механическое разрушение.

Таким образом, экспериментальные данные подтвердили, что добавление графена в небольших количествах (около 0,025 мас. %) значительно повышает адгезионные и антикоррозионные свойства эпоксидных покрытий. Этот результат подчёркивает перспективность графенового наполнителя для создания высокоэффективных защитных покрытий, способных успешно поддерживать длительное воздействие агрессивных сред.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данном исследовании была проведена комплексная оценка использования графенового порошка в составе эпоксидных порошковых покрытий для улучшения их антикоррозионных и адгезионных характеристик. Полученные результаты используют потенциал графена в качестве инновационного нанонаполнителя для защитных покрытий.

Одним из ключевых достижений работы стало определение оптимальных условий предотвращения дисперсии графена методом высокосдвигового отслаивания. Установлено, что использование водно-этанольного раствора в объёмном соотношении 6:4 в составе поливинилового спирта (ПВС) в качестве стабилизатора позволяет получать графен с высокой степенью диспергирования и стойкостью к агломерации. Это открывает широкие перспективы для метода масштабирования и его применения в производстве.

Композитные покрытия Gr/EP показали улучшенные антикоррозионные и адгезионные свойства по сравнению с чистым эпоксидным покрытием. Испытания в соляном тумане подтвердили, что добавление графена может создать барьерную защиту покрытия, замедляя процесс установки металлической подложки и тем самым проникая в агрессивные вещества. Электрохимические измерения, что покрытие Gr 0,025 % /EP устойчиво устойчиво к защите от покрытия: его сопротивление выше порядка, чем у чистого эпоксидного покрытия, даже после длительного возгорания.

Кроме того, покрытия Gr/EP улучшают механические характеристики. Испытания на прочность сцепления показали, что графен эффективно влияет на степень отслоения покрытия после длительного пребывания в агрессивной среде. Наибольшая прочность адгезии до 3,88 МПа у покрытий Gr 0,025 % /EP обеспечивает его возможность надёжно сохранять связь с металлической подложкой даже в экстремальных условиях.

Таким образом, результаты исследования доказывают, что использование графена в составе эпоксидных порошковых покрытий обеспечивает комплексное улучшение их свойств. Улучшение антикоррозионных свойств можно описать следующим уравнением:

$$R_{\text{корр}} = R_0 \times e^{-k \cdot C_{\text{графен}}},$$

где  $R_{\text{корр}}$  — сопротивление коррозии,  $R_0$  — начальное сопротивление коррозии без графена,  $k$  — коэффициент, зависящий от свойств графена,  $C_{\text{графен}}$  — концентрация графена.

Покрытие Gr 0,025 % /EP, содержащее допустимое количество графена, показало уменьшение характеристик, сочетание превосходной антикоррозионной стойкости, использования и механической прочности.

Полученные данные подчеркивают перспективность применения графена в качестве нанонаполнителя для создания устойчивых защитных механизмов, что особенно актуально в таких отраслях, как судостроение, нефтегазовая промышленность и энергетика, где металлические конструкции подвергаются интенсивным воздействиям агрессивных сред. Последующие исследования должны быть продолжены. Они будут нести в себе комплексные исследования других параметров эксплуатации, таких как температурная стойкость и совместимость с различными подложками, а также по разработке гибридных материалов.

## ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ИНФОРМАЦИЯ

**Вклад авторов.** Все авторы внесли существенный вклад в разработку концепции, проведение исследования и подготовку статьи, прочли и одобрили финальную версию перед публикацией. Личный вклад каждого автора: А.В. Иванов — концепция и дизайн исследования; В.В. Ваганов — составление плана проведения исследования; Т.Р. Майгельдинов — сбор и обработка материалов.

**Источники финансирования.** Авторы заявляют об отсутствии внешнего финансирования при проведении исследования.

**Конфликт интересов.** Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией настоящей статьи.

## ADDITIONAL INFO

**Author contributions.** All authors made substantial contributions to the conceptualization, investigation, and manuscript preparation, and reviewed and approved the final version prior to publication. Personal contribution: A.V. Ivanov: conceptualization, methodology; V.V. Vaganov: methodology; T.R. Maigeldinov: data curation, formal analysis.

**Funding sources.** The authors declare no external funding was received for conducting the study.

**Disclosure of interests.** The authors have no explicit or potential conflicts of interest associated with the publication of this article.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Стукач А.В. Изменение эксплуатационных свойств резины под действием температуры // Труды СПбГМТУ. 2024. № 1. С. 126–132. EDN: YTNRVC
2. Ваганов В.В., Ваганов Г.В. Наноматериалы и нанотехнологии в полиграфии: монография. Санкт-Петербург: Изд-во Политехн. ун-та, 2019. ISBN: 978-5-7422-6471-2 EDN: YZPMMP
3. Маркевич И.Е., Ваганов В.В. Исследование преимуществ красок с добавлением нанопигментов для цифровой печати. В кн.: Полиграфия: технология, оборудование, материалы. IX Международная научно-практическая конференция. Омск, 2018. С. 101–107. EDN: XRGDHF
4. Беленький Д.И., Балаханов Д.М., Добровольский В.И., Магомедов Т.М. Метрологическое обеспечение испытаний фильтров и фильтрующих. В кн.: Метрология физико-химических измерений. Материалы III Международной научно-технической конференции. Морозовка, 2019. С. 121–134.
5. Калиниченко М.Л., Долгий Л.П. Испытания на условный сдвиг и отрыв замкнутых конструкций. В кн.: Беларусь-Китай: контуры инновационно-технологического сотрудничества: сборник материалов научно-практической конференции. Республиканское инновационное унитарное предприятие «Научно-технологический парк БНТУ «Политехник». Минск: БНТУ, 2023. С. 82–83. EDN: FWYZAU
6. Иванов А.В., Петров, С.Н. Нанотехнологии в защите от коррозии: монография. Москва: Наука, 2021.
7. Сидоров В.И., Кузнецов Д.А. Графен и его применение в композиционных материалах: монография. Санкт-Петербург: Химия, 2020.
8. Блинов Л.Н., Иванов А.В. Физико-химические основы полиграфического производства. Санкт-Петербург: СПбГПУ, 2010. ISBN: 978-5-7422-2875-2 EDN: UNQDWF

## REFERENCES

1. Stukach AV. Changes in the performance properties of rubber under the influence of temperature. *Trudy SPbGMTU*. 2024;1:126–132. (In Russ.) EDN: YTNRVC
2. Vaganov VV, Vaganov GV. *Nanomaterials and nanotechnology in printing*. Sankt-Peterburg: Izd-vo Politekhn. un-ta; 2019. (In Russ.) ISBN: 978-5-7422-6471-2 EDN: YZPMMP
3. Markevich IE, Vaganov VV. Issledovanie preimushchestv krasok s dobavleniem nanopigmentov dlya cifrovoj pechati. In: *Printing: technology, equipment, materials. IX International scientific and practical conference*. Omsk; 2018:101–107. (In Russ.) EDN: XRGDHF
4. Belen'kij DI, Balahanov DM, Dobrovol'skij VI, Magomedov TM. Metrological safety of filters and flow filtrates. In: *Metrology of physical and chemical measurements. Proceedings of the III International Scientific and Technical Conference*. Morozovka; 2019:121–134. (In Russ.)
5. Kalinichenko ML, Dolgij LP. Experiments on the smooth movement and attempts of closed structures. In: *Belarus-China: outlines of innovative-technological cooperation: collection of materials from a scientific-practical conference. Republican Innovative Unitary Enterprise "Scientific-Technological Park BNTU" «Politekhnik»*. Minsk: BNTU; 2023:82–83. (In Russ.) EDN: FWYZAU
6. Ivanov AV, Petrov SN. *Nanotechnology in corrosion protection*. Moscow: Nauka, 2021. (In Russ.)
7. Sidorov VI, Kuznetsov DA. *Graphene and its application in composite materials*. Saint Petersburg: Himiya; 2020. (In Russ.)
8. Blinov LN, Ivanov AV. *Physicochemical foundations of printing production*. Saint Petersburg; St. Petersburg State Polytechnical University; 2010. (In Russ.) ISBN: 978-5-7422-2875-2 EDN: UNQDWF

## ОБ АВТОРАХ

\***Тимур Рушанович Майгельдинов**, магистрант высшей школы автоматизации и робототехники, Санкт-Петербургский государственный политехнический университет имени Петра Великого; адрес: 195251, Санкт-Петербург, Политехническая ул., д. 29; e-mail: maygeldinov@gmail.com

## AUTHORS' INFO

\***Timur R. Maygeldinov**, Master's student of the Higher School of Automation and Robotics, Peter the Great St. Petersburg State Polytechnic University; address: 29 Polytechnic str., Saint Petersburg, 195251, Russia; e-mail: maygeldinov@gmail.com

\* Автор, ответственный за переписку / Corresponding author

**Вячеслав Владимирович Ваганов**, канд. техн. наук, старший научный сотрудник, доцент высшей школы автоматизации и робототехники, Санкт-Петербургский государственный политехнический университет имени Петра Великого; eLibrary SPIN: 8051-7768; e-mail: prvaganov\_spb@mail.ru

**Александр Васильевич Иванов**, д-р техн. наук, директор издательства, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет; e-mail: iptranspb@gmail.com

**Vyacheslav V. Vaganov**, Cand. Sci. (Engineering), Senior Researcher, Associate Professor of the Higher School of Automation and Robotics, Peter the Great St. Petersburg State Polytechnic University; eLibrary SPIN: 8051-7768; e-mail: prvaganov\_spb@mail.ru

**Alexander V. Ivanov**, Dr. Sci. (Engineering), Director of Publishing House, Saint Petersburg State Marine Technical University; e-mail: iptranspb@gmail.com

Оригинальное исследование

УДК 623.812

DOI: [https://doi.org/10.52899/24141437\\_2025\\_02\\_169](https://doi.org/10.52899/24141437_2025_02_169)

EDN: USSCBQ

# Оптимизационно-поисковое проектирование корпусных конструкций плавучего дока по требованиям к прочности и устойчивости при общем продольном изгибе

В.Н. Тряскин<sup>1</sup>, Д.Т. Иванова<sup>1</sup>, В.А. Булкин<sup>2</sup><sup>1</sup> Санкт-Петербургский государственный морской технический университет, Санкт-Петербург, Россия;<sup>2</sup> Центральное морское конструкторское бюро «Алмаз», Санкт-Петербург, Россия

## АННОТАЦИЯ

**Актуальность.** В настоящее время в судостроительной отрасли большой интерес представляет автоматизация процесса проектирования корпусных конструкций. Разработка и развитие отечественных систем автоматизированного проектирования конструкции корпуса транспортных судов, военных кораблей, плавучих сооружений и в том числе плавучих доков, являются одними из наиболее перспективных и приоритетных задач. Применение оптимизационно-поисковых процедур при проектировании корпусных конструкций позволяет формализовать проблему автоматизированного принятия решения и обеспечивает получение заданных характеристик конструкции — минимальную массу, трудоемкость изготовления или стоимость в зависимости от постановки задачи.

**Цель работы.** Постановка и решение задачи проектирования конструкций корпуса плавучего дока по требованиям к прочности и устойчивости при общем продольном изгибе. В соответствии с методологией автоматизированного параметрического проектирования судовых конструкций, разработанной на кафедре Конструкции и технической эксплуатации судов СПбГМТУ, и принятой в качестве основы при разработке систем автоматизированного проектирования конструкций судов и других инженерных сооружений, рассматриваемая задача относится к задачам проектирования конструкций плавучего дока верхнего иерархического уровня.

**Материалы и методы.** Предполагается, что на предыдущих этапах более низкого уровня реализованы процедуры проектирования конструкций по требованиям к минимальным толщинам, местной прочности, прочности и устойчивости конструкций понтона при его общем изгибе. В качестве нормативного технического документа, регламентирующего требования к общей прочности и устойчивости, используются Правила Российского морского Регистра судоходства (РМРС). Структура требований Правил к конструкциям корпуса плавучего дока такова, что для решения рассматриваемой задачи необходимо применять итерационные поисковые процедуры. Для решения задачи предлагается использовать аппарат математического программирования.

**Результаты.** В настоящей задаче качестве целевой функции принимается математическая зависимость площади сечения эквивалентного бруса от варьируемых параметров. Вектор варьируемых переменных определяет требуемые добавки к начальным значениям толщин тех листовых конструкций, которые наиболее эффективно влияют на характеристики общей прочности корпуса дока. Предел текучести материала этих листовых конструкций также может быть включен в состав варьируемых параметров. Ограничения задачи формируются на основе конструктивных соображений и требований Правил РМРС. Ограничения-равенства позволяют получить решение задачи при некотором фиксированном значении выбранного варьируемого параметра. В виде ограничений-равенств могут быть представлены зависимости, позволяющие автоматически корректировать требуемые толщины листов конструкций, примыкающих к конструкциям, формирующим пояски эквивалентного бруса, или условие, фиксирующее значение предела текучести. Ограничения-неравенства формируются на основе соответствующих требований к общей прочности и устойчивости Правил РМРС.

**Заключение.** Апробация описанной задачи демонстрируется на примерах проектирования конструкций монолитного дока грузоподъемностью 12 000 т и понтонного дока грузоподъемностью 29 300 т. Показана эффективность предлагаемого метода решения задачи и возможность использования инструмента «Поиск решения» программного комплекса MS Excel.

**Ключевые слова:** плавучий док; монолитный док; понтонный док; общий продольный изгиб дока; прочность и устойчивость при общем продольном изгибе; оптимизационно-поисковое проектирование.

## Как цитировать

Тряскин В.Н., Иванова Д.Т., Булкин В.А. Оптимизационно-поисковое проектирование корпусных конструкций плавучего дока по требованиям к прочности и устойчивости при общем продольном изгибе // Труды Санкт-Петербургского государственного морского технического университета. 2025. Т. 4, № 2. С. 169–180. DOI: [10.52899/24141437\\_2025\\_02\\_169](https://doi.org/10.52899/24141437_2025_02_169) EDN: USSCBQ

Рукопись получена: 15.02.2025

Рукопись одобрена: 05.05.2025

Опубликована online: 20.06.2025

Original study article

DOI: [https://doi.org/10.52899/24141437\\_2025\\_02\\_169](https://doi.org/10.52899/24141437_2025_02_169)

EDN: USSCBQ

# Optimization and Search Design of Floating Dock Hull Structures Based on Strength and Stability Requirements Under Overall Longitudinal Bending State

Vladimir N. Tryaskin<sup>1</sup>, Dianna T. Ivanova<sup>1</sup>, Vladimir A. Bulkin<sup>2</sup><sup>1</sup> Saint Petersburg State Marine Technical University, Saint Petersburg, Russia;<sup>2</sup> Almaz Central Marine Design Bureau, Saint Petersburg, Russia

## ABSTRACT

**BACKGROUND:** Today, automation of hull structure design is of great interest in the shipbuilding industry. The development and advancement of Russian automated hull design systems for transport vessels, military ships, floating structures, including floating docks, are the most promising and priority tasks. Optimization and search design of hull structures allows formalizing the problem of automated decision-making and ensures the specified structural parameters, including low weight, labor intensity of manufacture or cost depending on the problem formulation.

**AIM:** This work aims to formulate and solve the problem of designing floating dock hull structures based on requirements to strength and stability under overall longitudinal bending state. Based on the automated parametric design method for ship structures developed by the Department of Ship Design and Maintenance of St. Petersburg State Marine Technical University and adopted as a basis for the development of automated design systems for ship and other engineering structures, the problem under consideration is designated as the high-level problem of designing the floating dock structures.

**METHODS:** It is assumed that the previous lower-level stages have implemented structure design processes based on requirements to the lowest thicknesses, local strength, strength, and stability of pontoon structures during its overall bending. The Rules of the Russian Maritime Register of Shipping (RMRS) are used as a technical standard providing the requirements to overall strength and stability. The structure of the Rules in relation to the floating dock hull design is such that it is required to apply iterative search methods to solve the problem under consideration. To solve the problem, it is proposed to use mathematic programming tools.

**RESULTS:** In this problem, the mathematical relationship of the cross-sectional area of the girder and the variable parameters is taken as the objective function. The trajectory of variables determines the required initial thicknesses allowance of the plate structures that have the most influence on the overall strength of the dock hull. Yield strength of such plate structures may also be included in the variable parameters. The constraints of this problem are determined based on design considerations and the RMRS Rules. Equality constraints allow to solve the problem for some fixed value of the selected variable. Equality constraints may include restrictions that allow automatic adjustment of the specified plate thickness of structures adjacent to structures of girder stays or the condition determining the yield strength. Inequality constraints are determined by the relevant overall strength and stability as specified in the RMRS Rules.

**CONCLUSION:** The described problem is tested by examples of structural designs of a cast-in-place dock with a carrying capacity of 12,000 tons and a pontoon dock with a carrying capacity of 29,300 tons. The study shows that the proposed method can adequately solve the problem and MS Excel's Solver tool may be used to solve it.

**Keywords:** floating dock; cast-in-place dock; pontoon dock; overall longitudinal dock bending; strength and stability under overall longitudinal bending state; optimization and search design.

## To cite this article

Tryaskin VN, Ivanova DT, Bulkin VA. Optimization and Search Design of Floating Dock Hull Structures Based on Strength and Stability Requirements Under Overall Longitudinal Bending State. *Transactions of the Saint Petersburg State Marine Technical University*. 2025;4(2):169–180. DOI: 10.52899/24141437\_2025\_02\_169 EDN: USSCBQ

Submitted: 15.02.2025

Accepted: 05.05.2025

Published online: 20.06.2025

## ВВЕДЕНИЕ

В конструкторских бюро судостроительного профиля активно используются методы и программное обеспечение для автоматизированного проектирования конструкций корпуса, как судов, так и других инженерных сооружений, например, таких как плавучий док (ПД). В статье рассматривается постановка и решение задачи проектирования конструкций ПД по требованиям Правил РМРС [1] к общей прочности и устойчивости при общем продольном изгибе дока с использованием оптимизационно-поисковых процедур.

В соответствии с методологией параметрического проектирования конструкций корпуса плавучих доков, предложенной в [2], и соответствующими рекомендациями Правил РМРС процесс проектирования конструкций ПД [1] по требованиям к общей продольной прочности относится к завершающему этапу процесса параметрического проектирования конструкций корпуса дока. На этом этапе в качестве исходной информации используются результаты проектирования элементов конструкций, полученные по требованиям к минимальным толщинам, местной прочности, прочности и устойчивости конструкций понтона при его общем изгибе.

В Правилах РМРС требование к общей продольной прочности сводится к регламентации момента сопротивления поперечного сечения корпуса дока (эквивалентного бруса — ЭБ) по состоянию на конец срока службы дока. Учет коррозионного износа продольных связей осуществляется путем введения в расчетную зависимость множителя, значение которого зависит от фактических характеристик поперечного сечения корпуса дока, которые могут быть определены только по завершении

проектировочного расчета. Такая задача может быть решена только методом последовательных приближений или в результате постановки и решения оптимизационно-поисковой задачи. Второй путь решения рассматривается в настоящей работе.

Аналогичные проблемы возникают при реализации требований к устойчивости листовых и балочных элементов при общем продольном изгибе корпуса дока.

## ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

При доковых операциях — постановке судна в плавучий док происходит общий продольный изгиб системы док-судно. Корпус судна и корпус плавучего дока в общем случае рассматривают как балки переменного сечения (переменной жесткости), соединенные рядом независимых упругих опор, жесткость которых определяется жесткостью днищевых конструкций судна, жесткостью конструкций понтона и жесткостью кильблоков (рис. 1).

Продольный изгибающий момент, действующий на систему док-судно, распределяется между плавучим доком и судном. За весь жизненный цикл дока в нем могут доковаться суда разного размера, с различными характеристиками жесткости корпуса [3]. При этом возможны случаи постановки в док сильно изношенных или даже поврежденных / аварийных судов, с малой жесткостью корпуса. Возможно докование одновременно несколько судов. Характеристики жесткости кильблоков — тоже величины недостаточно определенные.

В связи с этим требования к общей продольной прочности корпуса дока в Правилах классификации и постройки морских судов РМРС основаны на упрощенной модели изгиба корпуса дока под действием неравномерно

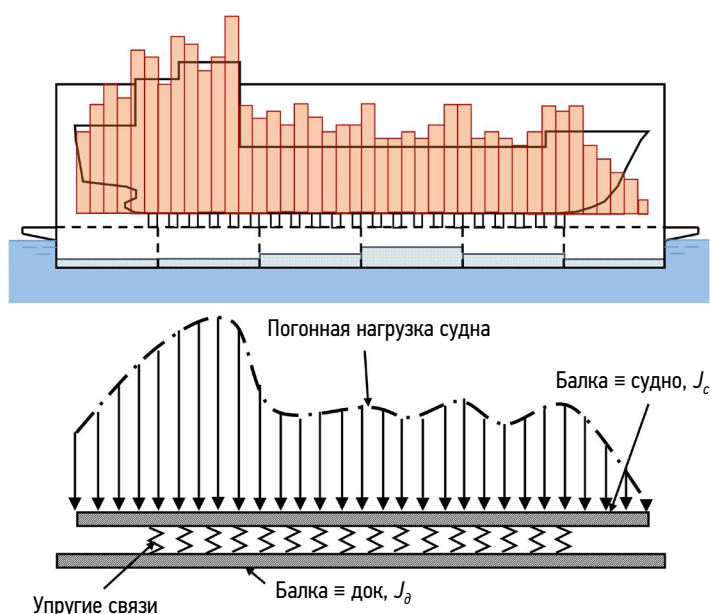


Рис. 1. Схема расчета прочности дока:  $J_c$  и  $J_d$  — моменты инерции судна и дока соответственно, переменные по длине.

Fig. 1. Calculation of the dock strength.  $J_s$  and  $J_d$  are the variable-length moments of inertia of the ship and the dock, respectively.



распределенной доковой нагрузки и сил поддержания, соответствующих расчетной осадке при доковании судна (рис. 2). Совместный изгиб дока и судна не учитывается.

Согласно требованиям Правил РМРС к общей продольной прочности ПД рассматриваются два условных расчетных случая:

- постановка длинного судна — перегиб дока (рис. 2, а);
- постановка короткого судна — прогиб дока (рис. 2, б).

Эпюры распределения доковой массы судна в общем случае представляют в виде фигуры, состоящей из прямоугольника и сегмента квадратичной параболы. В связи с этим погонная доковая нагрузка  $q_x$ , кН/м, в сечении, отстоящем на величину  $x$  в нос и в корму от миделя, определяется по формуле

$$q_x = \frac{g \Delta}{L_c \varphi} \left[ 1 - 3(1 - \varphi) \left( \frac{2x}{L_c} \right)^2 \right], \quad (1)$$

где  $2/3 \leq \varphi \leq 1,0$  — коэффициент полноты эпюры доковой массы судна.

Результаты расчета и их графическое представление показывают, что коэффициентам полноты распределения доковой массы судна  $\varphi = 2/3 \approx 0,67$  и  $\varphi = 1,00$  соответствуют две характерные эпюры. В первом случае — это полностью квадратичная парабола с нулевыми концевыми ординатами; во втором случае — горизонтальная прямая линия — равномерное распределение.

Расчетный изгибающий момент в любом сечении по длине дока  $M(x)$ , кН·м, соответствующий распределению массы судна согласно (1) рис. 2, определяется по формуле

$$M = k_M g \Delta L_{СП} \alpha(2x / L_{СП}), \quad (2)$$

где  $k_M = 0,125 \left( 1 - \frac{3\varphi - 1}{2\varphi} \cdot \frac{L_c}{L_{СП}} \right)$  — коэффициент рас-

четного изгибающего момента в миделевом сечении;  $\alpha(2x / L_{СП})$  — параметр формы эпюры моментов, зависящий от положения расчетного сечения относительно миделя (относительно середины длины дока по стапель-палубе).

Эпюры изменения параметров формы перегибающего и прогибающего моментов по длине дока представлены на рис. 3 и 4. Их значения можно определить по формулам (3) и (4) в зависимости от безразмерной абсциссы расчетного сечения дока относительно мидель-шпангоута  $\bar{x} = 2x / L_{СП}$ :

– для прогибающего момента

$$\alpha(\bar{x}) = -0,97\bar{x}^4 - 0,16\bar{x}^3 + 2,15\bar{x}^2 - 0,01\bar{x} - 1,00 \quad (3)$$

– для перегибающего момента

$$\alpha(\bar{x}) = -0,769\bar{x}^2 + 1,00. \quad (4)$$

Наличие таких зависимостей позволяет определить величину расчетного изгибающего момента в любом сечении по длине дока. Форма кривых  $\alpha(\bar{x})$  показывает, что требования к общей прочности существенно различаются в зависимости от положения расчетного сечения по длине дока. При этом в пределах средней части дока ( $\pm 0,2L_{СП}$  от миделя) расчетные изгибающие моменты изменяются не более чем на 15–25%.

Помимо общего изгиба дока, при доковании судна или нескольких судов в главных продольных связях

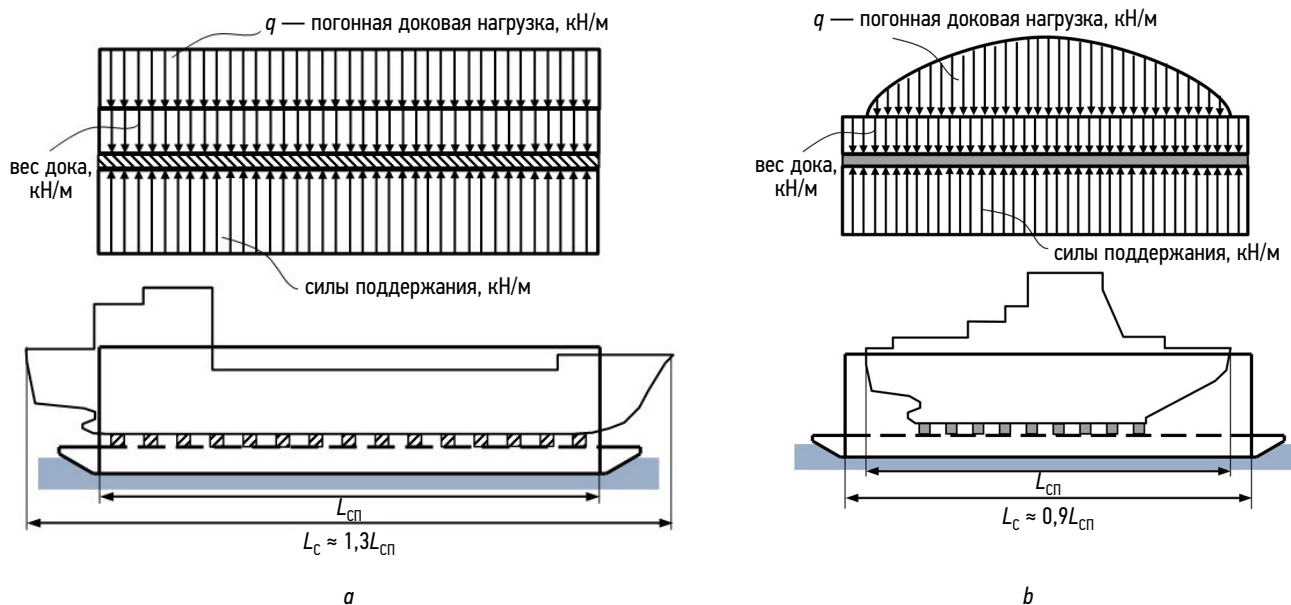


Рис. 2. Характер распределения доковой погонной нагрузки в соответствии с требованиями Правил РМРС для двух расчетных случаев: а — постановка длинного судна; б — постановка короткого судна.

Fig. 2. Distribution of load per unit length of the dock based on the RMRS Rules for two calculation cases: а, a long ship; б, a short ship.

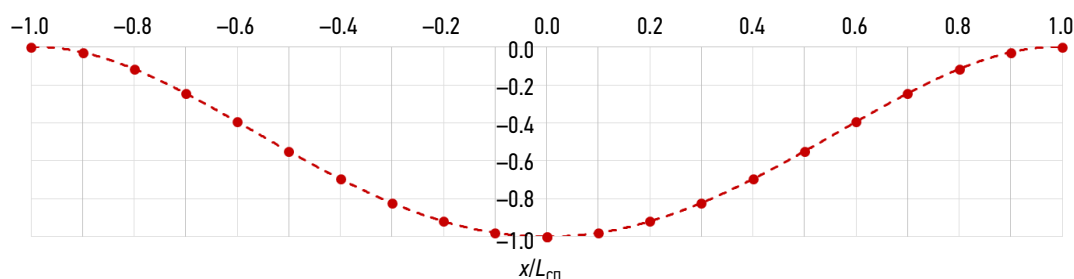


Рис. 3. Параметр формы эпюры прогибающего момента.  
Fig. 3. Parametric distribution diagram of the sagging moment.

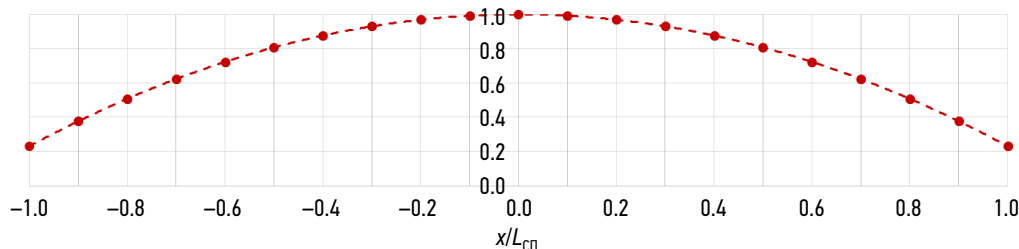


Рис. 4. Параметр формы эпюры перегибающего момента.  
Fig. 4. Parametric distribution diagram of the hogging moment.

неразрезного понтона монолитного дока возникает изгибающий момент  $M_y$ , кН·м, от общего изгиба понтона. Величина момента  $M_y$ , кН·м, определяется из решения задачи об изгибе конструктивно-ортотропной пластины на винклеровском<sup>1</sup> упругом основании (расчетные формулы и вспомогательные графические зависимости представлены в п. 3.12.4.5.6 [1]).

## ТРЕБОВАНИЯ ПРАВИЛ РМРС К ОБЩЕЙ ПРОЧНОСТИ И УСТОЙЧИВОСТИ КОРПУСНЫХ КОНСТРУКЦИЙ ДОКА ПРИ ОБЩЕМ ПРОДОЛЬНОМ ИЗГИБЕ

Правилами РМРС регламентируются следующие требования к общей продольной прочности и устойчивости для основных эксплуатационных режимов дока — докования судов (см. п. 3.12.4.6 [1]):

$$W_{act}^{d/b} \geq W_{req}^{d/b}, \tag{5}$$

$$\sigma_{\Sigma} = \sigma_1 + \sigma_2 \leq k_{\sigma} \sigma_n, \tag{6}$$

$$\sigma_{cr\_pl} \geq k_{b\_pl} \sigma_{c\_pl}, \tag{7}$$

$$\sigma_{cr\_ls} \geq k_{b\_ls} \sigma_{c\_ls}, \tag{8}$$

<sup>1</sup> Простейшая применяемая на практике форма упругого основания пластины, представляет собой ряд тождественных близко расположенных линейных пружин без какой-либо сдвиговой связи между ними. Такое упрощение реального непрерывного упругого основания точно реализуется в случае пластин, плавающих на поверхности жидкости.

где  $W_{act}^{d/b}$  и  $W_{req}^{d/b}$  — фактические (*act*) и требуемые Правилами (*req*) моменты сопротивления поперечного сечения корпуса дока на уровне верхней и нижней фибры на начало срока службы, см<sup>3</sup>;  $\sigma_{\Sigma}$ ,  $\sigma_1$ ,  $\sigma_2$  — напряжения в главных продольных связях понтона монолитного дока по состоянию к концу нормативного срока службы: суммарные —  $\sigma_{\Sigma}$ , от общего продольного изгиба дока —  $\sigma_1$ , от общего изгиба понтона —  $\sigma_2$ , МПа;  $k_{\sigma}$  — коэффициент допускаемых суммарных напряжений в главных продольных связях понтона монолитного дока;  $\sigma_{cr\_pl}$ ,  $\sigma_{cr\_ls}$  — критические нормальные напряжения листовых элементов (*\_pl*) и продольных балок набора (*\_ls*), МПа;  $k_{b\_pl}$  и  $k_{b\_ls}$  — коэффициенты запаса устойчивости для листовых элементов и продольных балок набора;  $\sigma_{c\_pl}$ ,  $\sigma_{c\_ls}$  — расчетные сжимающие напряжения в продольных связях эквивалентного бруса, МПа.

## ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ КОНСТРУКЦИИ КОРПУСА ПД ПО ТРЕБОВАНИЯМ К ОБЩЕЙ ПРОЧНОСТИ И УСТОЙЧИВОСТИ ПРИ ОБЩЕМ ПРОДОЛЬНОМ ИЗГИБЕ

Задача проектирования конструкций корпуса судна или другого инженерного сооружения может быть представлена в общем виде задачи математического программирования [4–6]:

минимизировать целевую функцию

$$GF(\mathbf{X}) \rightarrow \min \quad (9)$$

при ограничениях:

$$h_j(\mathbf{X}) = 0, \quad j = 1, \dots, m \quad (10)$$

$$g_j(\mathbf{X}) \geq 0, \quad j = 1, \dots, p \quad (11)$$

и граничных условиях

$$(x_i)_{\min} \leq x_i \leq (x_i)_{\max}, \quad i = 1, \dots, k \quad (12)$$

где  $\mathbf{X} = [x_1, \dots, x_k]^T$  — вектор-столбец значений независимых переменных — варьируемых параметров конструкции;  $k$  — количество варьируемых параметров;  $m$  — число ограничений-равенств;  $p$  — число ограничений-неравенств.

## Исходные данные

Для решения задачи необходимо подготовить следующую исходную информацию.

Предполагается, что известен архитектурно-конструктивный тип дока (пontonный, монолитный), заданы главные размерения дока и расчетная грузоподъемность, выполнена конструктивная компоновка понтона и башен: определены системы набора конструкций, расставлены продольные и поперечные балки основного и рамного набора. Должны быть определены значения расчетных изгибающих моментов при общем продольном изгибе дока (для случая прогиба,  $M^-$  и перегиба,  $M^+$ ). Для монолитного дока дополнительно должно быть известно значение расчетного изгибающего момента в главных продольных связях понтона от общего изгиба понтона,  $M_y$ .

Размеры связей корпуса, определенные на предшествующих этапах проектирования по требованиям к местной прочности с учетом ограничений по минимальным толщинам, также являются входными параметрами для рассматриваемой задачи.

## Варьируемые параметры. Целевая функция

Из условий общей продольной прочности корпуса дока регламентируются размеры следующих элементов конструкций (см. рис. 5):

- *монолитные доки*: толщина листов топ-палубы и верхних участков стенок башен, а в некоторых случаях — толщины листов днища, боковых стенок и продольных переборок понтона;
- *пontonные доки*: толщины листов топ-палубы, днища башен, верхних и нижних участков стенок башен.

Может также оказаться целесообразным применение для этих конструкций сталей повышенной прочности. Предел текучести материала этих листовых конструкций, следовательно, также может быть включен в состав варьируемых параметров.

Требования к устойчивости при общем продольном изгибе дока могут быть определяющими при проектировании листовых элементов и продольных балок основного и рамного набора: топ-палубы и стенок башен пontonных и монолитных доков; наружной обшивки, полотнища, продольных переборок понтона и настила стапель-палубы монолитных доков; обшивки днища башен пontonных доков.

Особенно серьезные проблемы могут возникать при обеспечении устойчивости листовых элементов топ-палубы и стенок башен при поперечной системе набора (даже у доков небольшой грузоподъемности).

Таким образом, в качестве *варьируемых параметров* целесообразно принимать:

- требуемые добавки к начальным значениям, определяемым на предшествующих этапах проектирования (в соответствии с требованиями к минимальным толщинам, местной и (или) поперечной прочности) толщин тех листовых конструкций, которые наиболее эффективно влияют на характеристики общей прочности корпуса дока (см. рис. 5);

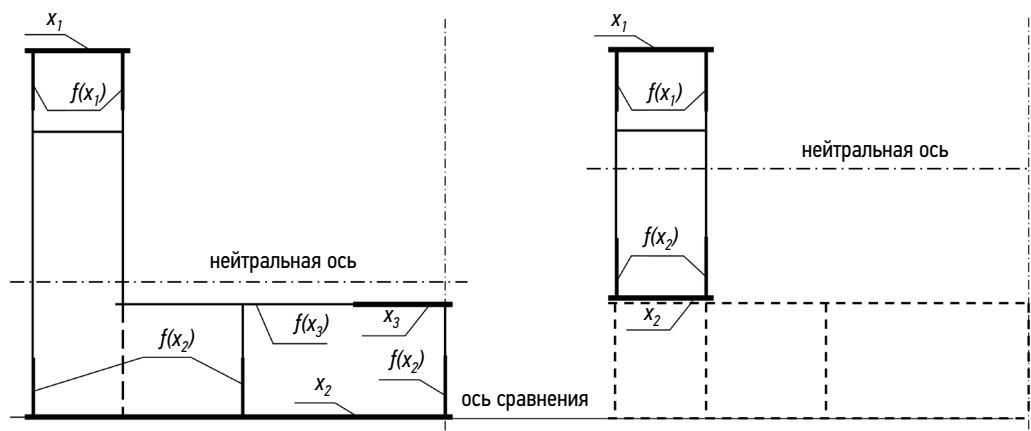


Рис. 5. Варьируемые параметры для монолитного и пontonного доков (обозначение  $f(x_i)$  указывает, что толщина рассматриваемого листа определяется в зависимости от значения  $i$ -го варьируемого параметра).

Fig. 5. Variable parameters of cast-in-place and pontoon docks ( $f(x_i)$  indicates that the thickness of the analyzed plate is determined by the  $i$ -th variable value).

- предел текучести материала связей, наиболее удаленных от нейтральной оси эквивалентного бруса (см. рис. 5).

В качестве *целевой функции* принимается математическая зависимость площади сечения эквивалентного бруса от варьируемых параметров.

В данной работе проблема поискового проектирования конструкций плавучего дока по требованиям к общей прочности и устойчивости при общем продольном изгибе рассматривается на примере проектирования конструкции корпуса монолитного плавучего дока грузоподъемностью 12 000 т и понтонного дока грузоподъемностью 29 300 т. Конструктивные схемы поперечных сечений доков представлены на рис. 6, а) и 6, б) соответственно.

Вектор варьируемых переменных представим в следующем виде

$$\mathbf{X} = \{x_i\}^T, \quad i = 1, \dots, k \quad (13)$$

где  $k$  — количество варьируемых параметров.

В рассматриваемой задаче (см. рис. 6) принимается 3 варьируемых параметра ( $k = 3$ ), представляющие собой требуемые добавки:

- $x_1 = \delta x_1$  — к толщине настила топ-палубы;
- $x_2 = \delta x_2$  — к толщине обшивки днища понтона (монолитный док) или днища башни (понтонный док);
- $x_3 = \delta x_3$  — к толщине настила стапель-палубы (монолитный док).

Фактические толщины, полученные после решения задачи будут определяться как

$$s_i = s_{i_0} + x_i,$$

где  $s_{i_0}$  — толщина  $i$ -ой связи, определяемая на предшествующем этапе проектирования в соответствии с требованиями к минимальным толщинам, местной и (или) поперечной прочности.

Предполагается, что предел текучести материала корпусных конструкций задан.

Толщину участков стенок башен, боковых стенок и продольных переборок понтона,  $s_{id}$ , примыкающих к конструкциям, толщина которых варьируется, будем представлять в виде следующих функциональных связей

$$s_{id} = \max \{s_{i_0}; s_i - \delta_i\}, \quad i = 1, \dots, m \quad (14)$$

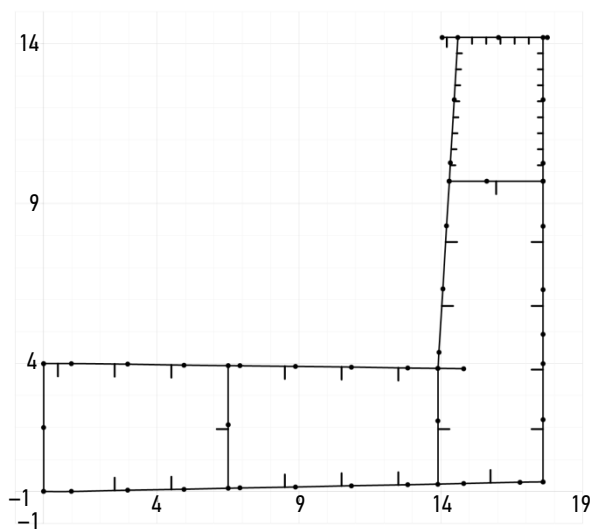
где  $\delta_i \leq \max \{0, 3s_{\max}; 5 \text{ мм}\}$  — уменьшение (перепад) толщины, устанавливаемый проектантом, мм;  $m$  — количество листовых структур, толщина которых варьируется (в рассматриваемом случае  $m = 3$ );  $id = id(i)$  — число элементов эквивалентного бруса, размеры которых зависят от  $i$ -го варьируемого параметра.

В рамках рассматриваемой задачи предполагается, что продольные балки топ-палубы и стенок башен будут выполнены из полосового профиля (рис. 7). Толщину стенки продольных балок основного набора целесообразно связать некоторой функциональной зависимостью с толщиной листовой конструкции, на которой рассматриваемая балка установлена. Такая зависимость ниже будет представлена в виде ограничения-неравенства (22), вытекающего из условия устойчивости продольных балок.

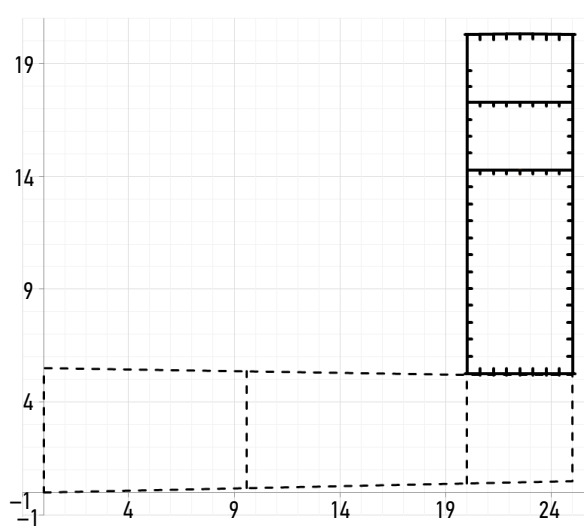
В качестве целевой функции принимается площадь сечения эквивалентного бруса  $A(\mathbf{X})$ , характеризующая массу продольных связей корпуса дока, которую необходимо минимизировать. В общем случае  $A(\mathbf{X})$  является функцией всех варьируемых параметров.

$$A(\mathbf{X}) = A_0 + \sum_{i=1}^{i=n} \delta f_i(\mathbf{X}) \rightarrow \min, \quad (15)$$

где  $A_0$  — площадь сечения эквивалентного бруса, соответствующая размерам продольных связей, полученным на предшествующем этапе проектирования



а) монолитный док грузоподъемностью 12 000 т



б) понтонный док грузоподъемностью 29 300 т

Рис. 6. Поперечные сечения доков, выбранных для тестирования.

Fig. 6. Cross-sections of the tested docks.

в соответствии с требованиями к минимальным толщинам и местной прочности (не изменяемая величина), см<sup>2</sup>;  $\delta f_i(\mathbf{X})$  — добавки к площади сечения  $i$ -ой связи, размеры которой корректируются в процессе решения поисковой задачи, см<sup>2</sup>;  $n$  — общее количество изменяемых продольных связей, размеры которых корректируются.

### Ограничения-равенства и ограничения-неравенства

**Ограничения-равенства** позволяют зафиксировать значение некоторой варьируемой переменной или какой-либо характеристики конструкции на заданном уровне и для настоящей задачи могут быть записаны в виде

$$h_j(x_j) = x_j - x_{j\text{-fix}} = 0; j = 1, \dots, m \quad (16)$$

где  $x_{j\text{-fix}}$  — фиксированное значение  $j$ -го варьируемого параметра;  $m$  — общее число ограничений-равенств.

**Ограничения-неравенства** построены на основе требований Правил РМРС, рассмотренных выше (см. (4)–(6)). При записи функциональных зависимостей (для компактности) характеристики, зависящие от нескольких варьируемых переменных, представляются в виде функции полного вектора варьируемых переменных  $\mathbf{X}$ , хотя на их значения могут влиять не все варьируемые переменные.

$$g_1(\mathbf{X}) = W_{act}^d(\mathbf{X}) - W_{req}^d(\mathbf{X}) \geq 0, \quad (17)$$

$$g_2(\mathbf{X}) = W_{act}^b(\mathbf{X}) - W_{req}^b(\mathbf{X}) \geq 0, \quad (18)$$

$$g_3(\mathbf{X}) = \sigma_{\Sigma}(\mathbf{X}) - k_{\sigma} \sigma_n \geq 0, \quad (19)$$

$$g_4(\mathbf{X}) = \sigma_{cr\_pl}(\mathbf{X}) - k_{b\_pl} \sigma_{c\_pl}(\mathbf{X}) \geq 0, \quad (20)$$

$$g_5(\mathbf{X}) = \sigma_{cr\_ls}(\mathbf{X}) - k_{b\_ls} \sigma_{c\_ls}(\mathbf{X}) \geq 0, \quad (21)$$

при этом ограничение (21) будет использоваться в виде (22) и (23).

Условия (17) – (21) регламентируют:

- момент сопротивления на уровне верхнего пояса эквивалентного бруса (на уровне топ-палубы) — неравенство  $g_1(\mathbf{X})$ ;
- момент сопротивления на уровне нижнего пояса эквивалентного бруса — неравенство  $g_2(\mathbf{X})$ ;
- допустимый уровень суммарных напряжений (от общего изгиба дока и общего изгиба понтона) в главных продольных связях понтона монолитного дока — неравенство  $g_3(\mathbf{X})$ ;
- устойчивость листовых элементов, участвующих в общем продольном изгибе дока — неравенство  $g_4(\mathbf{X})$ ;
- устойчивость продольных балок основного набора — неравенство  $g_5(\mathbf{X})$ .

Для формирования целевой функции и ограничений (15)–(21) используются следующие зависимости

$$W_{req}^{d/b}(\mathbf{X}) = \frac{\max\{|M^-|; |M^+|\} \cdot 10^3}{k_{\sigma} \sigma_{n\_d/b}(R_{eH})} \omega_{k\_d/b}(\mathbf{X}),$$

$$\sigma_{n\_d/b}(R_{eH}) = 235 / \eta_{d/b}(R_{eH}),$$

$$\eta(R_{eH}) = -3,6482 \cdot 10^{-8} \cdot R_{eH}^3 + 4,3433 \cdot 10^{-5} \cdot R_{eH}^2 - 1,8303 \cdot 10^{-2} \cdot R_{eH} + 3,3761,$$

$$\omega_{k\_d/b}(\mathbf{X}) = \left(1 - A(\mathbf{X})^{-1} \sum \Delta f_i(x_i) \Phi_{i\_d/b}(\mathbf{X})\right)^{-1},$$

$$A(\mathbf{X}) = A_0 + \sum_{i=1}^{i=n} \delta f_i(\mathbf{X}).$$

Для листовых элементов:

$$\Delta f_i = 10 \Delta s_i b_i,$$

где

$$\Delta s_i = k_z u_i T.$$

Для продольного набора из полосового проката

$$\Delta f_i(x_i) = 0,1 n_i h_{0i}(x_i) k_z u_{ni} T, i = 1, \dots, m,$$

$$\Phi_{i\_d/b}(\mathbf{X}) = c_i^2(\mathbf{X}) (A(\mathbf{X}) / I(\mathbf{X})) + c_i(\mathbf{X}) / z_{0\_d/b}(\mathbf{X})$$

где  $k_{\sigma} = 1, 0$  — коэффициент допускаемых напряжений от общего продольного изгиба;  $\omega_{k\_d/b}(\mathbf{X})$  — коэффициент, учитывающий поправку к моменту сопротивления на износ элементов конструкций;  $\eta_{d/b}(R_{eH})$  — коэффициент использования механических свойств стали<sup>2</sup>;  $R_{eH}$  — предел текучести рассматриваемой связи, может принимать различные значения для связей верхнего ( $R_{eH\_d}$ ) и нижнего ( $R_{eH\_b}$ ) поясков эквивалентного бруса, МПа;  $\Delta f_i(x_i)$  — добавка к площади сечения  $i$ -го элемента поперечного сечения дока, см<sup>2</sup>, учитывающая его запас на износ;

$\Phi_{i\_d/b}(\mathbf{X})$  — множитель, учитывающий влияние изменения площади сечения  $i$ -го элемента на момент сопротивления;  $\Delta s_i$  — уменьшение толщины  $i$ -ой листовой связи вследствие износа за срок службы  $T$ , годы, при скорости коррозионного изнашивания  $k_z u_i$ , мм/год, принимаемой согласно табл. 3.12.1.4.2 [1], мм;  $b_i$  — ширина  $i$ -ой листовой связи, м;  $n_i$  — число балок набора в  $i$ -ой группе;  $h_{0i}$  — высота стенки балки из полосового проката, см;  $u_{ni}$  — нормативная скорость коррозионного изнашивания балок набора  $i$ -ой группы, мм/год;  $I(\mathbf{X})$  — момент инерции поперечного сечения корпуса дока, см<sup>2</sup>м<sup>2</sup>, соответствующий требуемому моменту сопротивления (фактический момент инерции поперечного сечения дока на начало срока службы);  $c_i(\mathbf{X})$  — отстояние центра тяжести площади сечения  $i$ -ой связи ( $i$ -ой группы продольных

<sup>2</sup> Параметр  $\eta(R_{eH})$  представлен в виде полинома, аппроксимирующего табличную функцию п. 1.1.4.3 [1].

балок) от нейтральной оси, положение которой соответствует  $W(X)$  и  $I(X)$ ;  $z_{0_{(d/b)}}(X)$  — отстояние точки, на уровне которой определяется момент сопротивления, от нейтральной оси, положение которой соответствует  $W(X)$  и  $I(X)$ .

При определении  $z_{0_{(d/b)}}(X)$  и  $c_i(X)$  должен учитываться их знак: положительные вниз и отрицательные вверх от нейтральной оси.

Условие (19) преобразуется с учетом расчетных зависимостей общего вида

$$1,0 - \frac{\sigma_1(X) + \sigma_2(X)}{k_\sigma \sigma_{n_{(b)}}} \geq 0,$$

$$\sigma_1(X) = \frac{\max\{|M^-|; |M^+|\} \cdot z_{0_{(b)}}(X) \cdot 10^5}{I'(X)},$$

$$\sigma_2(X) = \frac{M_y \cdot z_y(X) \cdot 10^5}{I'_y(X)},$$

где  $I'(X)$  — момент инерции поперечного сечения корпуса дока на конец срока службы, см<sup>4</sup>;  $z_y(X)$  — отстояние днища понтона от нейтральной оси сечения главной продольной связи понтона, м;  $I'_y(X)$  — момент инерции поперечного сечения главной продольной связи, определённый с учетом износа элементов связей к концу срока службы дока, см<sup>4</sup>.

Условие (20) преобразуется с учетом расчетных зависимостей, связывающих эйлеровы и критические напряжения к виду:

$$\begin{cases} \sigma_{cri}^{(plates)}(X) = \sigma_{ei}(X) \text{ при } \sigma_{ei}(X) \leq 0,5R_{eH}, \\ \sigma_{cri}^{(plates)}(X) = R_{eH} \left(1 - \frac{R_{eH}}{4\sigma_{ei}(X)}\right) \text{ при } \sigma_{ei}(X) > 0,5R_{eH} \end{cases}$$

$$\sigma_{ei}(X) = 0,1854 n_i(X) \left( (x_i - \Delta s_i) / b_i \right)^2, i = 1, \dots, m$$

при  $0 \leq \psi_i(X) \leq 1$ :

$$n_i(X) = \begin{cases} \frac{8,4}{\psi_i(X) + 1,1} \text{ при } \gamma_i = \frac{a_i}{b_i} > 1, \\ \varepsilon_i \left( \gamma_i + \frac{1}{\gamma_i} \right)^2 \frac{2,1}{\psi_i(X) + 1,1} \text{ при } \gamma_i < 1 \end{cases}$$

при  $-1 \leq \psi_i(X) \leq 0$ :

$$n_i(X) = \begin{cases} 10\psi_i^2(X) - 6,4\psi_i(X) + 7,6 \text{ при } \gamma_i > 1, \\ \varepsilon_i \left[ 10\psi_i^2(X) - 14\psi_i(X) + 1,9(1 + \psi_i(X)) \left( \gamma_i + \frac{1}{\gamma_i} \right)^2 \right] \text{ при } \gamma_i < 1 \end{cases}$$

$$\begin{cases} \sigma_{ci}(X) = \frac{M^+}{I'(X)} z_i(X) \text{ при } z_i(X) > 0, \\ \sigma_{ci}(X) = \frac{M^-}{I'(X)} z_i(X) \text{ при } z_i(X) < 0, \end{cases}$$

$$\psi_i(X) = \frac{\sigma_{ci}^1(X)}{\sigma_{ci}^2(X)}$$

где  $n_i(X)$  — коэффициент, зависящий от вида нагружения пластин и отношения сторон их опорного контура;  $s'_i(X)$  — толщина  $i$ -ой листовой связи на конец срока службы, мм;  $b_i$  — сторона листового элемента, перпендикулярная направлению действия нормальных сжимающих напряжений, м;  $a_i$  — противоположная сторона листового элемента, м;  $\psi_i(X)$  — коэффициент, учитывающий степень неравномерности сжатия кромок пластины;  $z_i(X)$  — отстояние рассматриваемой связи от нейтральной оси, м.

Условие устойчивости продольных балок основного набора (21), установленных на листовых элементах конструкций плавучего дока, корректируемых в процессе решения задачи, предлагается преобразовать к виду

$$\frac{i'(x_i)}{f'(x_i)} - \frac{1,25R_{eH}l^2}{206} \geq 0, i = 1, \dots, m \quad (22)$$

где  $i'(x_i)$  и  $f'(x_i)$  — момент инерции и площадь поперечного сечения балки с присоединенным пояском, см<sup>4</sup>, определяемые с учетом износа по состоянию на конец срока службы;  $l$  — пролет рассматриваемой балки, м.

При определении характеристик  $i'(x_i)$  и  $f'(x_i)$  ширину присоединенного пояска можно принять равным расстоянию между балками.

В случае использования полосового профиля необходимо контролировать соотношению высоты стенки к ее толщине. Толщина стенки балки должна находиться в определенном конструктивном соотношении с толщиной листа, на которой балка установлена. Эти ограничения можно представить в виде

$$\frac{h_w}{s_w} \leq 20\sqrt{\eta(R_{eH})}, \quad (23)$$

$$s_{w\_id}(s_i) = ks_i, k = 0.8 \div 1,25, \quad (24)$$

$$h_{w\_id}(s_i) = (15 \div 20)ks_i\sqrt{\eta(R_{eH})}, \quad (25)$$

где  $s_{w\_id}(s_i)$  — толщина стенки балки, мм;  $h_{w\_id}(s_i)$  — высота стенки балки, мм;  $s_i$  — толщина присоединенного пояска, мм.

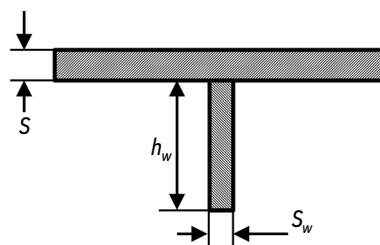


Рис. 7. Поперечное сечение продольной балки основного набора.  
Fig. 7. Cross-section of the girder in the main set.

Расчет геометрических характеристик поперечного сечения плавучего дока осуществляется на начало срока службы (с нулевым износом, новая конструкция) и на конец срока службы (с максимальным износом, рассчитанным на полный срок службы дока). Расчет геометрических характеристик представляется в табличном виде.

### Граничные условия

Граничные условия определяют диапазон допускаемых значений варьируемых параметров. Граничные значения добавок к толщине устанавливаются на усмотрение проектанта следующим образом

$$(x_i)_{\min} \leq x_i \leq (x_i)_{\max}, \quad i = 1, \dots, 3, \quad (26)$$

$$(x_i)_{\min} = 0, 0; \quad (x_i)_{\max} = 10, 0. \quad (27)$$

## РЕЗУЛЬТАТЫ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ

Условия (17)–(21) хорошо демонстрируют циклический характер задачи: при изменении размеров какой-либо связи ЭБ, изменяются не только геометрические характеристики ЭБ, но и требования, предъявляемые РМРС к элементам конструкции при общем изгибе дока.

Результаты решения задачи с использованием инструмента *MS Excel* «Поиск решения» представлены ниже в табл. 1–3.

Начальные значения характеристик общей прочности (для монолитного дока):

$$\frac{W_{act}^d}{W_{req}^d} = \frac{3,62 \cdot 10^6}{5,44 \cdot 10^6} = 0,67 \leq 1,0,$$

$$\frac{W_{act}^b}{W_{req}^b} = \frac{7,53 \cdot 10^6}{5,51 \cdot 10^6} = 1,37 \geq 1,0,$$

$$\frac{\sum \sigma}{[\sigma]} = \frac{256,49}{301,28} = 0,851 \leq 1,0.$$

Момент сопротивления на уровне топ-палубы не удовлетворяет требованиям Правил РМРС.

Результаты решения оптимизационно-поисковой задачи (для **монолитного** дока):

$$\frac{W_{act}^d}{W_{req}^d} = \frac{4,82 \cdot 10^6}{4,82 \cdot 10^6} = 1,00 \geq 1,0,$$

$$\frac{W_{act}^b}{W_{req}^b} = \frac{8,55 \cdot 10^6}{5,27 \cdot 10^6} = 1,62 \geq 1,0,$$

$$\frac{\sum \sigma}{[\sigma]} = \frac{222,89}{301,28} = 0,740 \leq 1,0.$$

Требуемые добавки к толщине составляют:

- для настила топ-палубы 9 мм.

Соответственно были увеличены прилегающие к топ-палубе листы стенок башен для обеспечения перепада толщин не более 5 мм.

Начальные значения характеристик общей прочности (для **понтонного** дока):

$$\frac{W_{act}^d}{W_{req}^d} = \frac{4,60 \cdot 10^6}{9,87 \cdot 10^6} = 0,47 \leq 1,0,$$

$$\frac{W_{act}^b}{W_{req}^b} = \frac{5,39 \cdot 10^6}{1,03 \cdot 10^7} = 0,52 \leq 1,0.$$

Момент сопротивления на уровне топ-палубы и на уровне днища башен не удовлетворяют требованиям Правил РМРС.

Результаты решения оптимизационно-поисковой задачи (для **понтонного** дока):

$$\frac{W_{act}^d}{W_{req}^d} = \frac{8,62 \cdot 10^6}{8,62 \cdot 10^6} = 1,00 \geq 1,0,$$

$$\frac{W_{act}^b}{W_{req}^b} = \frac{9,04 \cdot 10^6}{9,04 \cdot 10^6} = 1,00 \geq 1,0.$$

Таблица 1. Характеристики поперечного сечения

Table 1. Cross section parameters

Характеристики поперечного сечения	Исходное значение	Результат решения	Исходное значение	Результат решения
	Монолитный док 12 000 т		Понтонный док 29 300 т	
$e$ , м	4,616	5,124	6,912	7,327
$F$ , см <sup>2</sup>	18906	19989	14156	20553
$J$ , м <sup>2</sup> см <sup>2</sup>	347395	437456	372415	662516
$W_{act}^{d/lb}$ , см <sup>3</sup>	3,62·10 <sup>6</sup>	4,82·10 <sup>6</sup>	4,60·10 <sup>6</sup>	8,62·10 <sup>6</sup>
	7,53·10 <sup>6</sup>	8,55·10 <sup>6</sup>	5,39·10 <sup>6</sup>	9,04·10 <sup>7</sup>

Примечание:  $e$  — аппликата нейтральной оси относительно ОП;  $F$  — площадь поперечного сечения эквивалентного бруса;  $J$  — момент инерции поперечного сечения эквивалентного бруса;  $W_{act}^{d/lb}$  — моменты сопротивления поперечного сечения на уровне топ-палубы и днища понтона (днища башни).

Note:  $e$ , neutral axis vertical center relative to the baseline;  $F$ , cross-sectional area of the girder;  $J$ , cross-sectional moment of inertia of the girder;  $W_{act}^{d/lb}$ , cross-sectional section moduli at the level of the top deck and the pontoon bottom (wingwall bottom).

Таблица 2. Результаты решения задачи (монолитный док)

Table 2. Problem solution (for a cast-in-place dock)

Наименование конструктивного элемента	Исходное значение	Результат решения
Толщина настила топ-палубы, мм	8	17
Прилегающие к топ-палубе листы стенок башен, мм	10	12
Продольные балки топ-палубы	160×10	240×14
Настил стапель-палубы, мм	без-корректировок	
Настил стапель-палубы, мм	без-корректировок	

Таблица 3. Результаты решения задачи (понтонный док)

Table 3. Problem solution (for a pontoon dock)

Наименование конструктивного элемента	Исходное значение	Результат решения
Толщина настила топ-палубы, мм	8	24
Прилегающие к топ-палубе листы стенок башен, мм	8	24
Днище башен, мм	11	28
Продольные балки топ-палубы	160×10	280×19
Продольные балки днища башен	180×11	330×22

Требуемые добавки к толщине составляют:

- для настила топ-палубы 16 мм;
- для днища башен 17 мм.

Соответственно увеличены прилегающие к топ-палубе и к днищу башен листы стенок башен для обеспечения перепада толщин не более 5 мм.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предлагаемый метод решения задачи проектирования конструкций корпуса плавучего дока в соответствии с требованиями к прочности и устойчивости при общем продольном изгибе с использованием оптимизационно-поисковых процедур может эффективно применяться при проектировании конструкций плавучих доков.

Задача может решаться с использованием инструмента MS Excel «Поиск решения». На основе предлагаемого подхода планируется создание специализированного программного обеспечения, которое будет использоваться для решения аналогичных задач в составе системы автоматизированного параметрического проектирования конструкций САПР-К, разрабатываемой на кафедре Конструкции и технической эксплуатации судов СПбГМТУ.

## ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ИНФОРМАЦИЯ

**Вклад авторов.** Все авторы внесли существенный вклад в разработку концепции и методологии организации расчетов, реализацию расчетной части и подготовку статьи, прочли и одобрили финальную версию перед публикацией. Личный вклад каждого автора: В.Н. Тряскин — разработка методологии, анализ результатов; Д.Т. Иванова — организация оптимизационно-поисковой задачи, апробация задачи на реальных проектах плавучих доков, анализ результатов; В.А. Булкин — анализ результатов, верификация расчетов.

**Источники финансирования.** Авторы заявляют об отсутствии внешнего финансирования при проведении исследования.

**Конфликт интересов.** Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией настоящей статьи.

## ADDITIONAL INFO

**Author contributions:** All authors made substantial contributions to the conceptualization, investigation, and manuscript preparation, and reviewed and approved the final version prior to publication. Personal contribution: V.N. Tryaskin: methodology, formal analysis; D.T. Ivanova: optimization and search methodology, problem testing on real-life floating dock projects, formal analysis; V.A. Bulkin: formal analysis, verification.

**Funding sources:** The authors declare no external funding was received for conducting the study.

**Disclosure of interests:** The authors have no explicit or potential conflicts of interest associated with the publication of this article.



## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Правила классификации и постройки морских судов. Ч. II. Корпус. Российский Морской Регистр Судоходства. М.: Минтранс, 2024.
2. Тряскин В.Н. Проектирование конструкций корпуса плавучего дока по требованиям к общей прочности. В кн.: Регистр СССР: науч.-техн. сб. М.: Транспорт, 1991. Вып. 18. С. 3–18.
3. Ловягин М.А., Корсаков В.М., Каганер Я.Б. и др. Металлические плавучие доки. Л.: Судостроение, 1964.
4. Тряскин В.Н. Методология автоматизированного проектирования конструкций корпуса судна. автореферат дисс. д-ра техн. наук. Санкт-Петербург, 2007. EDN: NIUJAJ
5. Тряскин В.Н. Автоматизированное параметрическое проектирование конструкций корпуса судна. СПб.: СПбГМТУ, 2010. ISBN: 978-5-88303-476-2 EDN: QNXHPP
6. Гарин Э.Н. Поисковые методы в проектировании судовых корпусных конструкций, устройств и систем. СПб.: СПбГМТУ, 2003.

## REFERENCES

1. Rules for the classification and construction of sea-going vessels. Part II. Hull. Russian Maritime Register of Shipping. Moscow: MinTrans, 2024. (In Russ.)
2. Tryaskin VN. Design of floating dock hull structures based on overall strength requirements. In: *USSR Register: scientific and technical collection*. Moscow: Transport; 1991;18:3–18. (In Russ.)
3. Lovyagin MA, Korsakov VM, Kaganer YaB, et al. *Metal floating docks*. Leningrad: Sudostroenie, 1964. (In Russ.)
4. Tryaskin VN. Methodology of automated design of ship hull structures. [Abstract of dissertation]. St. Petersburg, 2007. (In Russ.) EDN: NIUJAJ
5. Tryaskin VN. *Automated parametric design of ship hull structures*. Sankt-Peterburg: SPbGMTU; 2010. (In Russ.) ISBN: 978-5-88303-476-2 EDN: QNXHPP
6. Garin EN. *Search methods in the design of ship hull structures, devices and systems*. Sankt-Peterburg: SPbGMTU; 2003. (In Russ.)

## ОБ АВТОРАХ

**Владимир Николаевич Тряскин**, д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой конструкции и технической эксплуатации судов, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет; eLibrary SPIN: 7663-8210; e-mail: vladimir.tryaskin@smtu.ru

\***Дианна Тимофеевна Иванова**, старший преподаватель кафедры конструкции и технической эксплуатации судов, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет; адрес: 190121, Санкт-Петербург, ул. Лоцманская, 3; eLibrary SPIN: 1314-7682; e-mail: D.T.Ivanova@smtu.ru

**Владимир Аронович Булкин**, инженер-конструктор 1 кат., АО «ЦМКБ «Алмаз»; e-mail: almaz.bulkin@yandex.ru

## AUTHORS' INFO

**Vladimir N. Tryaskin**, Dr. Sci. (Engineering), Professor, Head of the Department of Ship Design and Technical Operation, Saint Petersburg State Marine Technical University; eLibrary SPIN: 7663-8210; e-mail: vladimir.tryaskin@smtu.ru

\***Dianna T. Ivanova**, Senior Lecturer at the Department of Ship Design and Technical Operation, Saint Petersburg State Marine Technical University; address: Lotsmanskaya, 3, Saint Petersburg, 190121, Russia; eLibrary SPIN: 1314-7682; e-mail: D.T.Ivanova@smtu.ru

**Vladimir A. Bulkin**, Design Engineer of the 1st Category, JSC "CMDB "Almaz"; e-mail: almaz.bulkin@yandex.ru

\* Автор, ответственный за переписку / Corresponding author

Оригинальное исследование

УДК 623.812

DOI: [https://doi.org/10.52899/24141437\\_2025\\_02\\_181](https://doi.org/10.52899/24141437_2025_02_181)

EDN: VOKWZV

# Обоснование нормативного износа элементов конструкций плавучего дока в требованиях к общей прочности и устойчивости Правил РМРС на основе вероятностного моделирования

Д.Т. Иванова, В.Н. Тряскин

Санкт-Петербургский государственный морской технический университет, Санкт-Петербург, Россия

## АННОТАЦИЯ

**Обоснование.** Согласно действующим Правилам РМРС, Часть II «Корпус», п. 3.12 Плавучие доки, допускаемые напряжения при общем продольном изгибе дока и расчетные сжимающие напряжения в требованиях к устойчивости продольных связей нормируются по состоянию на конец расчетного срока службы дока и определяются в предположении, что все элементы эквивалентного бруса (ЭБ) имеют 100% нормативный износ. Между тем, такая ситуация в реальных условиях маловероятна.

**Цель.** В рамках совершенствования требований Правил РМРС к общей продольной прочности и устойчивости при общем изгибе дока необходимо оценить допускаемый уровень нормативного износа элементов корпусных конструкций плавучих доков в расчетных зависимостях, регламентирующих общую прочность и устойчивость, с целью обоснованного смягчения этих требований.

**Методы.** Для достижения поставленной задачи предполагается применить специальную методику оценки среднего износа продольных связей корпуса дока по состоянию на конец срока службы, основанную на случайном моделировании уменьшения размеров каждого элемента ЭБ в связи с коррозионным износом с использованием датчиков случайных чисел. Указанная методика позволит построить гистограммы распределения значений добавок на износ для характеристик эквивалентного бруса (площади сечения, минимального момента сопротивления, центрального момента инерции), аппроксимировать их неким теоретическим законом, найти математическое ожидание и значения этих характеристик с заданной обеспеченностью.

**Выводы.** Представленные в настоящей работе оценки показывают, что добавки на коррозионный износ следует принимать на уровне: 65-70% от величин, регламентируемых Правилами на конец нормативного срока службы дока. Это приведет к существенному смягчению требований к общей продольной прочности и устойчивости при общем продольном изгибе корпуса дока.

**Ключевые слова:** плавучий док; нормативный износ дока; добавка на износ; требования Правил РМРС; общая продольная прочность; устойчивость при общем продольном изгибе.

## Как цитировать

Иванова Д.Т., Тряскин В.Н. Обоснование нормативного износа элементов конструкций плавучего дока в требованиях к общей прочности и устойчивости Правил РМРС на основе вероятностного моделирования // Труды Санкт-Петербургского государственного морского технического университета. 2025. Т. 4, № 2. С. 181–188. DOI: [10.52899/24141437\\_2025\\_02\\_181](https://doi.org/10.52899/24141437_2025_02_181) EDN: VOKWZV

Original study article

DOI: [https://doi.org/10.52899/24141437\\_2025\\_02\\_181](https://doi.org/10.52899/24141437_2025_02_181)

EDN: VOKWZV

# Justification of the Specified Wear of Structural Elements of Floating Docks in the Overall Strength and Stability Requirements of the Rules of the Russian Maritime Register of Shipping by Probabilistic Modeling

Dianna T. Ivanova, Vladimir N. Tryaskin

Saint Petersburg State Marine Technical University, Saint Petersburg, Russia

## ABSTRACT

**BACKGROUND:** According to Part II (Hull), Para. 3.12 (Floating Docks) of the Rules of the Russian Maritime Register of Shipping (RMRS Rules), permissible stresses for overall longitudinal bending of the dock and calculated compressive stresses in the requirements to the stability of longitudinal frame are standardized as of the end of the estimated service life of the dock and determined on the assumption that the specified wear of all girder elements is 100%. However, such case is unlikely in real-life conditions.

**AIM:** To improve the RMRS Rules in relation to overall longitudinal strength and stability under overall longitudinal bending state of the dock, it is required to assess the specified permissible wear of floating dock hull structures as the estimated ratios regulating the overall strength and stability to reasonably relax these requirements.

**METHODS:** To achieve the set task, it is proposed to use a special method to assess the average wear of the longitudinal hull frame of the dock at the end of its service life by random modeling of corrosion-related dimension reduction of each girder element using random number generators. The method will allow to build bar graphs of wear allowance distribution for the girder parameters (sectional area, lowest section modulus, central moment of inertia), approximate them with a certain theoretical law, determine the expected value and values of these parameters with a given probability.

**CONCLUSIONS:** The estimates presented in this paper show that corrosion allowances should be taken at about 65%–70% of the values provided by the Rules as of the end of the standard service life of the dock. This will result in a significant relaxation of the requirements to overall longitudinal strength and stability under overall longitudinal bending state of the dock hull.

**Keywords:** floating dock; specified dock wear; wear allowance; RMRS Rules requirements; overall longitudinal strength; stability under overall longitudinal bending state.

## To cite this article

Ivanova DT, Tryaskin VN. Justification of the Specified Wear of Structural Elements of Floating Docks in the Overall Strength and Stability Requirements of the Rules of the Russian Maritime Register of Shipping by Probabilistic Modeling. *Transactions of the Saint Petersburg State Marine Technical University*. 2025;4(2):181–188. DOI: [10.52899/24141437\\_2025\\_02\\_181](https://doi.org/10.52899/24141437_2025_02_181) EDN: VOKWZV

Submitted: 13.02.2025

Accepted: 03.04.2025

Published online: 25.06.2025

## ВВЕДЕНИЕ

В процессе эксплуатации плавучего дока (ПД) элементы корпусных конструкций (листы, балки набора) подвергаются коррозионному износу. Как известно из практического опыта эксплуатации плавучих доков и других морских сооружений, износ элементов конструкций, работающих в одинаковых условиях, довольно редко принимает одинаковые значения.

Возникает проблема определения фактических характеристик поперечного сечения эквивалентного бруса на конец срока службы с учетом неравномерного износа его элементов.

С целью решения такой задачи предлагается проанализировать моделирование износа элементов конструкций, участвующих в общем продольном изгибе дока, с применением датчика случайных чисел.

## ТРЕБОВАНИЯ ПРАВИЛ РМРС К ОБЩЕЙ ПРОЧНОСТИ И УСТОЙЧИВОСТИ ПРОДОЛЬНЫХ СВЯЗЕЙ

При разработке действующих требований Правил к общей продольной прочности плавучего дока нормативные допускаемые напряжения определялись в предположении, что все элементы эквивалентного бруса имеют 100% износ.

Добавка на коррозионный износ  $i$ -го элемента конструкции ПД при этом определяется по формуле

$$\Delta s_i = u_{zon\_i} T, \quad (1)$$

где  $u_{zon\_i} = k_{zon} u_i$  — нормативная скорость среднегодового уменьшения толщины  $i$ -ой связи эквивалентного бруса, определяемая с учетом зонального коэффициента  $k_{zon}$ ;  $T$  — нормативный расчетный срок службы дока, принимаемый равным 50 лет, если нет других условий.

Требования к общей продольной прочности корпуса плавучих доков Правил РМРС [1] подробно были рассмотрены в [2, 3].

В общем виде, согласно [1], требуемый момент сопротивления поперечного сечения корпуса дока на начало срока службы,  $W$ , см<sup>3</sup>, определяется по формуле

$$W = W' \omega_k, \quad (2)$$

где  $W' = \frac{M_{max}}{k_\sigma \sigma_n} 10^3$  — требуемый момент сопротивления

поперечного сечения к концу срока службы дока, см<sup>3</sup>;  $\omega_k$  — коэффициент, определяющий добавку к моменту сопротивления на износ элементов конструкций, находится по формуле, учитывающей износ одновременно всех элементов эквивалентного бруса;  $M_{max} = \{M^{sag}; M^{hog}\}$  — наибольший расчетный изгибающий момент, кН·м;  $M^{sag}$  — изгибающий момент, вызывающий прогиб дока, кН·м;  $M^{hog}$  — изгибающий момент, вызывающий перегиб дока, кН·м;  $k_\sigma$  — коэффициент допускаемых

напряжений от общего продольного изгиба, который принимается равным 1,0;  $\sigma_n$  — нормативный предел текучести по нормальным напряжениям, МПа.

Условие устойчивости согласно [1] имеет вид

$$k \sigma_{ci} \leq \sigma_{cri}, \quad (3)$$

где  $k$  — коэффициент запаса устойчивости;

$\sigma_{ci} = \frac{M}{J'} z_i \cdot 10^5$  — расчетные сжимающие напряжения  $i$ -го элемента, определяемые для поперечного сечения дока к концу расчетного срока службы, МПа;  $\sigma_{cri} = f(\sigma_e)$  — критические напряжения для  $i$ -го элемента ЭБ определяемые с учетом 100% износа, МПа;  $M$  — расчетный изгибающий момент, вызывающий сжатие  $i$ -го элемента ЭБ, кН·м;  $J'$  — фактический момент инерции поперечного сечения ЭБ, определяемый к концу срока службы дока, см<sup>4</sup>;  $z_i$  — отстояние  $i$ -го элемента ЭБ от нейтральной оси, м.

Расчетные сжимающие и критические напряжения в условии устойчивости (3) также определяются с учетом 100%-го износа элементов эквивалентного бруса.

Из условий общей прочности (2) и устойчивости (3) следует, что они могут приводить к необоснованному увеличению размеров продольных связей корпуса дока. Это подтверждается опытом практического использования требований Правил РМРС.

## МЕТОДИКА И АЛГОРИТМ ОПРЕДЕЛЕНИЯ СРЕДНЕСТАТИСТИЧЕСКОГО ИЗНОСА КОРПУСА ДОКА ПО СОСТОЯНИЮ НА КОНЕЦ СРОКА СЛУЖБЫ

Для корректировки требований к конструкциям плавучих доков Правил РМРС в плане смягчения требований по общей прочности и устойчивости при общем продольном изгибе предлагается методика учета неравномерности износа элементов конструкции дока в процессе эксплуатации. Такой же подход принят в Правилах МАКО, регламентирующих требования к конструкции корпуса нефтеналивных и навалочных судов. Характеристики поперечного сечения корпуса из условия общей прочности и расчетные сжимающие напряжения в условиях устойчивости листовых и балочных элементов конструкций таких судов регламентируются по состоянию на середину срока службы, т.е. при 50%-ном износе. Учитывая, что расчетный срок службы судна в Правилах МАКО принимается 25 лет, а также существенно большие значения скоростей среднегодового уменьшения элементов конструкции нефтеналивных и навалочных судов по сравнению с доковыми конструкциями, нормативное состояние конструкций дока по износу может быть иным.

Предлагается методика оценки износа конструкций дока к концу нормативного срока службы с заданной

обеспеченностью, основанная на вероятностном моделировании. Предполагается, что в процессе эксплуатации дока происходит коррозионный износ конструкций, обеспечивающих его общую прочность. Скорости износа для каждого конструктивного элемента могут изменяться от нуля до максимального значения, регламентируемого Правилами. Для каждого  $i$ -го элемента ЭБ среднее значение скорости износа в течение расчетного срока службы  $T$  и, соответственно, добавки на износ  $\Delta S_i$ , определяемые по формуле (1), генерируется с использованием датчика случайных чисел для равномерного распределения.

По результатам моделирования строятся статистические законы распределения добавок на износ или их относительных величин в долях или в % от максимального значения.

Подбирается теоретическое распределение наилучшим образом аппроксимирующее статистическое распределение (гистограмму). Для этого используются известные методы и критерии проверки статистических гипотез (критерии  $\chi^2$  — Пирсона, критерий Колмогорова).

Далее определяется нормативный износ конструкций по состоянию на конец срока службы с заданной обеспеченностью (например, с использованием правила 3-х стандартов).

Похожая методика рассмотрена в работе [4] при обосновании так называемого эквивалентного срока службы судна. В этой работе с использованием вероятностного подхода моделировались результаты замеров остаточных толщин конструкций судов в эксплуатации.

Ниже на основе предложенной методики рассмотрен алгоритм решения задачи обоснования нормативного износа конструкций корпуса дока по состоянию на конец срока службы, который предполагает решение следующих задач:

1. Построение расчетных зависимостей для определения добавок на коррозионный износ к требуемым

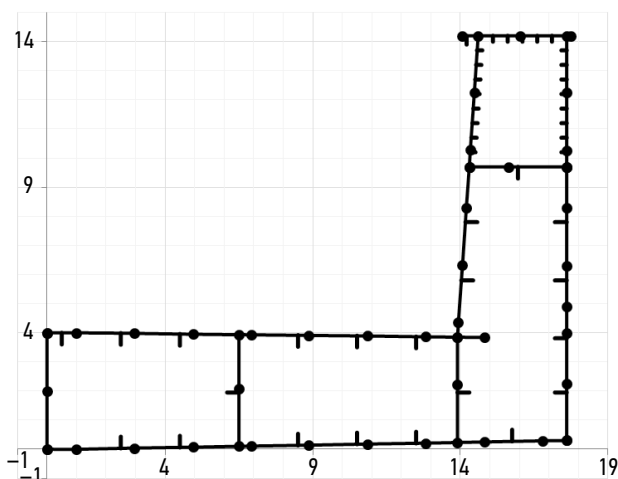


Рис. 1. Схема поперечного сечения эквивалентного бруса монолитного дока грузоподъемностью 12 000 т.

Fig. 1. Cross-sectional girder diagram of a cast-in-place dock with a carrying capacity of 12,000 tons.

характеристикам поперечного сечения корпуса дока.

2. Моделирование износа конструкций с использованием датчиков случайных чисел.
3. Построение статистических законов (гистограмм) распределения добавок на коррозионный износ.
4. Аппроксимация статистического распределения теоретическим законом. Проверка согласования теоретического и статистического распределений с использованием методов проверки правдоподобия статистических гипотез.
5. Обоснование нормативного износа конструкций плавучего дока в требованиях к общей прочности и устойчивости.

## ПОДГОТОВКА РАСЧЕТНЫХ ЗАВИСИМОСТЕЙ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ДОБАВОК НА КОРРОЗИОННЫЙ ИЗНОС К ХАРАКТЕРИСТИКАМ ПОПЕРЕЧНОГО СЕЧЕНИЯ КОРПУСА ДОКА

В качестве примера рассмотрим поперечное сечение монолитного плавучего дока грузоподъемностью 12 000 т, схема эквивалентного бруса которого соответствует рис. 1.

Добавки, учитывающие износ элементов для каждого  $j$ -го эксперимента, можно определить по известным аналитическим зависимостям:

$$\text{— добавка к площади — } \Delta F_j = \sum_i \Delta f_i, \text{ см}^2;$$

— добавка к моменту инерции —

$$\Delta J_j = \sum_i \Delta i_{0i} + \sum_i \Delta f_i \cdot z_i^2 - \frac{\left(\sum_i \Delta f_i \cdot z_i\right)^2}{\Delta F_j}, \text{ м}^2\text{см}^2;$$

— добавка к моменту сопротивления на уровне верхнего пояса (топ-палубы) ЭБ —

$$\Delta W_j^d = \frac{\Delta J_j}{\left(D - \frac{\sum_i \Delta f_i \cdot z_i}{\Delta F_j}\right)} \cdot 100, \text{ см}^3;$$

— добавка к моменту сопротивления на уровне нижнего пояса (днища понтона) ЭБ —

$$\Delta W_j^b = \frac{\Delta J_j}{\left(\frac{\sum_i \Delta f_i \cdot z_i}{\Delta F_j}\right)} \cdot 100, \text{ см}^3.$$

При этом:

$j = 1 \dots n$  — количество рассматриваемых вариантов износа ЭБ (общее число экспериментов в выборке или объем выборки);

$\Delta f_i$  — добавка к площади поперечного сечения  $i$ -го элемента ЭБ, учитывающая его износ, см<sup>2</sup>;

$\Delta j_{0i}$  — добавка к собственному моменту инерции  $i$ -го элемента ЭБ, учитывающая его износ, м<sup>2</sup>см<sup>2</sup>;

$z_i$  — отстояние центра тяжести  $\Delta f_i$  от оси сравнения (ось сравнения принята на уровне основной плоскости ПД), м;

$D$  — расчетная высота плавучего дока, м.

Согласно положениям, описанным в [5], при малом объеме выборки  $n$  распределение существенно отличается от функции распределения Колмогорова, но уже при  $n \geq 15 \dots 20$  ошибка при вычислении вероятности «согласия» оказывается малой и при дальнейшем увеличении объема выборки практически не изменяется. По критерию согласия Пирсона, по рекомендациям [6] объем выборки должен быть не менее 100, согласно этому, в настоящей работе принято  $n = 100$ .

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ИЗНОСА КОНСТРУКЦИЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ДАТЧИКОВ СЛУЧАЙНЫХ ЧИСЕЛ

В работе моделирование износа выполняется в процессе реализации в ячейке вычислительной процедуры следующего вида

$$u_i = \text{СЛУЧМЕЖДУ}(0; u_i^{max} \cdot 10^3) / 10^3 \quad (4)$$

где  $u_i^{max}$  — максимально допустимая Правилами РМРС скорость коррозионного износа, которая соответствует табличным значениям, представленным в п. 3.12.1.4.2 [1], мм/год.

Функция СЛУЧМЕЖДУ(минимальный порог; максимальный порог), реализуемая в Microsoft Excel, генерирует случайное целое число между значениями минимального и максимального порога включительно.

Используя сгенерированную скорость коррозионного износа согласно (4), можно определить добавку на износ  $i$ -го элемента,  $\Delta s_i$ , мм, по (1).

Гистограммы распределения значений добавок на износ характеристик эквивалентного бруса построены

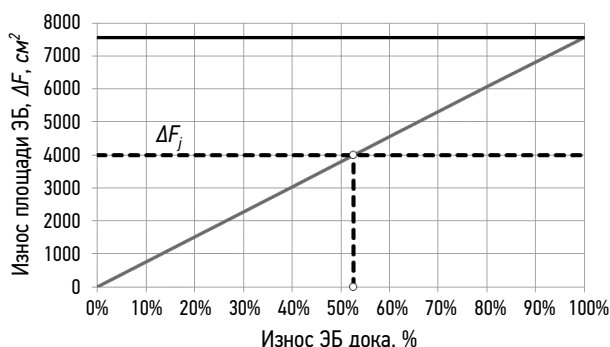


Рис. 2. Изменение добавки к площади сечения ЭБ в зависимости от степени износа дока.

Fig. 2. Change in the cross-sectional area allowance of the girder depending on the degree of wear of the dock.

в результате анализа  $n$  различных вариантов износа ЭБ. Для каждого  $j$ -го эксперимента определяются характеристики:  $\Delta F_j$ ;  $\Delta J_j$ ;  $\Delta W_j^d$ ;  $\Delta W_j^b$  и износ в процентах, с учетом, что  $\Delta F_{max}$  — соответствует полному износу всех элементов ЭБ дока по состоянию на конец срока службы (т.е. при  $u_i = u_i^{max}$ , мм/год), 100% износ;  $\Delta F_{min} = 0$  — соответствует началу срока службы дока (т.е. при  $u_i = 0$ , мм/год), износ составляет 0%, см. рисунок 2. Уровень износа для характеристик:  $\Delta J_j$ ;  $\Delta W_j^d$ ;  $\Delta W_j^b$  определяется аналогично  $\Delta F_j$ .

## ПОСТРОЕНИЕ СТАТИСТИЧЕСКИХ ЗАКОНОВ (ГИСТОГРАММ) РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ДОБАВОК НА КОРРОЗИОННЫЙ ИЗНОС

Получена выборка, состоящая из  $n$  вариантов различных износов поперечного сечения ПД (объем выборки), для которых определены фактические геометрические характеристики ЭБ и соответствующий им уровень износа в процентах. Для полученной выборки выполняется анализ частот попадания в тот или иной разряд гистограммы (с шагом 5% от  $T$  или  $\Delta T = 2,5$  года), с использованием функции ЧАСТОТА(массив\_данных; массив\_интервалов), реализуемая в Microsoft Excel. В результате принимается наибольшее полученное значение износа, по которому строится результирующая гистограмма.

Гистограмма распределения фактического износа поперечного сечения плавучего дока будет построена с принятым в настоящей работе шагом равным  $\Delta T$ , результаты представлены на рис. 3.

Важно, что функция СЛУЧМЕЖДУ( ) обновляет сгенерированное случайное значение при каждом пересчете (клавиша F9), таким образом можно рассмотреть результаты анализа для нескольких выборок, что позволит более достоверно оценить полученный результат.

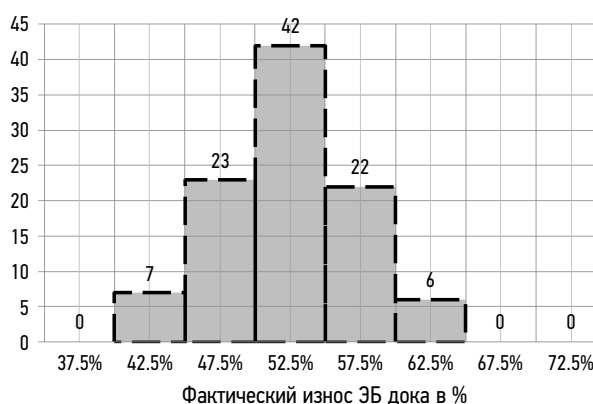


Рис. 3. Гистограмма распределения износа дока в %.

Fig. 3. Wear distribution bar graph (%).

## АППРОКСИМАЦИЯ СТАТИСТИЧЕСКОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ТЕОРЕТИЧЕСКИМ ЗАКОНОМ

Аппроксимация статистического закона распределения некоторым теоретическим законом позволяет получить оценки нормативного износа дока с заданной обеспеченностью (вероятностью превышения).

Построение теоретических законов распределения износа конструкций корпуса ПД заключается в том, чтобы подобрать теоретическую плавную кривую распределения, описывающую данное статистическое распределение. Вопрос о согласовании теоретического и статистического распределения решается методами проверки правдоподобия гипотез с использованием двух критериев согласия:

- критерия  $\chi^2$  (критерия Пирсона);
- критерия Колмогорова.

В настоящей работе анализируется соответствие статистического распределения нормальному закону (закон Гаусса), гамма-распределению, распределению Вейбулла. Показано, что эти теоретические распределения приводят практически к одинаковым результатам, поэтому принято решение использовать нормальный закон.

Ниже представлены основные математические зависимости, которые использовались для построения нормального закона распределения, и расчетные формулы для определения характеристик критериев согласия [7–9].

### Нормальный закон распределения

Плотность вероятности

$$f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{(x-m)^2}{2\sigma^2}\right). \quad (5)$$

Математическое ожидание

$$M(x) = \int_{-\infty}^{\infty} xf(x) dx, \quad (6)$$

$$M(x) = \sum_{i=1}^n x_i p_i = m. \quad (7)$$

Дисперсия случайной величины

$$D(x) = \int_{-\infty}^{\infty} (x-m)^2 f(x) dx, \quad (8)$$

$$D(x) = M(x^2) - M(x)^2. \quad (9)$$

Среднее квадратическое отклонение

$$\sigma = \sqrt{D(x)}. \quad (10)$$

Функция распределения

$$F(x) = \int_{-\infty}^x f(x) dx = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^x \exp\left(-\frac{(x-m)^2}{2\sigma^2}\right) dx. \quad (11)$$

### Критерий согласия $\chi^2$ .

Находим значение критерия по формуле

$$\chi^2 = \sum_{z=1}^k \frac{(n_z - n_z^*)^2}{n_z^*} \quad (12)$$

где  $n_z$  — эмпирические частоты, определенные с помощью функции *ЧАСТОТА(массив\_данных; массив\_интервалов)* для полученной выборки;

$n_z^*$  — теоретические частоты, которые определяются как произведение плотности вероятности на участке от  $x_k$  до  $x_{k+1}$  на общее число значений в рассматриваемой выборке  $n$  ( $n = 100$ ), используя функции Excel можно записать для нормального распределения

$$n_z^* = (\text{НОРМРАСП}(x_{z+1}; m; \sigma; \text{ИСТИНА}) - \text{НОРМРАСП}(x_z; m; \sigma; \text{ИСТИНА})) * n;$$

$k$  — число интервалов настоящей выборки.

Определяем критическое значение критерия  $\chi_{\text{крит}}^2$  на уровне значимости  $\alpha$  и с  $(k-1)$  степенью свободы, в среде Excel для определения  $\chi_{\text{крит}}^2$  может быть использована функция *ХИ2ОБР(вероятность; степени\_свободы)*, которую можно записать в виде

$$= \text{ХИ2ОБР}(\alpha = 0,05; k - 1).$$

Если  $\chi^2 < \chi_{\text{крит}}^2$ , гипотезу о распределении можно принять, иначе стоит отвергнуть.

### Критерий А.Н. Колмогорова

Имея эмпирические частоты для каждого рассматриваемого интервала  $n_j$  ( $\Delta T = 2,5$  года), можем определить накопленные эмпирические частоты  $\sum n_j$ , например, для второго разряда накопленная частота будет равна сумме частот для первого и второго интервалов и т.д.

Определяются теоретические частоты  $n_j^*$  (как для критерия Пирсона) и соответствующие им накопленные частоты  $\sum n_j^*$ .

Вычисляется разность накопленных частот для всех интервалов  $k$ , максимальное по модулю отклонение теоретических от эмпирических частот обозначено, как  $\lambda$ .

При  $\lambda < \lambda_{\text{крит}}$  гипотеза о распределении может быть принята, иначе — отклоняется, при этом  $\lambda_{\text{крит}}$  определяется по формуле

$$\lambda_{\text{крит}} = \frac{1,36}{\sqrt{n}}, \text{ при } \alpha = 0,05. \quad (13)$$

Математическое ожидание значений нормативного износа конструкций,  $m$ , может быть его осредненной оценкой. Более жесткой оценкой нормативного износа конструкций будет значение, смещенное относительно математического ожидания ( $m$ ) на  $(1 \div 3)\sigma$  в сторону больших значений.

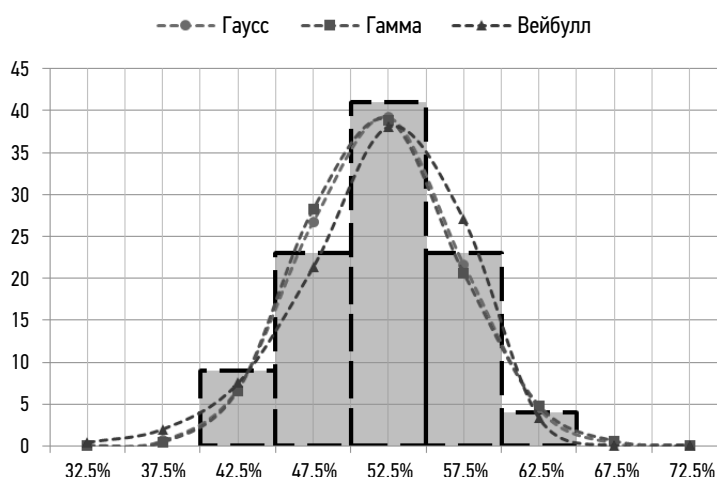


Рис. 4. Гистограмма распределения эмпирических и теоретических частот износа монолитного дока грузоподъемностью 12 000 т.  
Fig. 4. Distribution bar graph of empirical and theoretical wear rates of a cast-in-place dock with a carrying capacity of 12,000 tons.

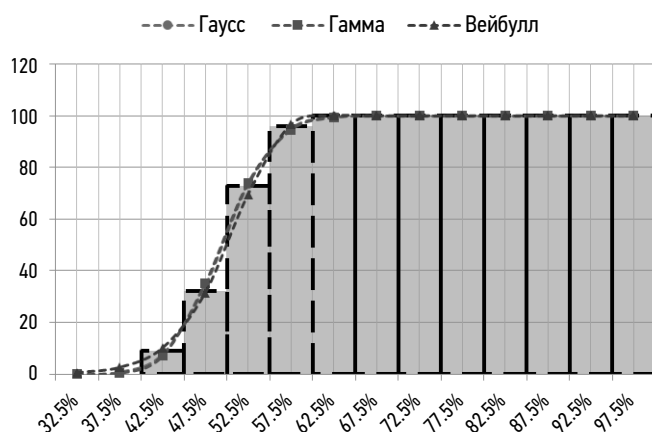


Рис. 5. Гистограмма распределения накопленных эмпирических и теоретических частот износа монолитного дока грузоподъемностью 12 000 т.  
Fig. 5. Distribution bar graph of accumulated empirical and theoretical wear rates of a cast-in-place dock with a carrying capacity of 12,000 tons.

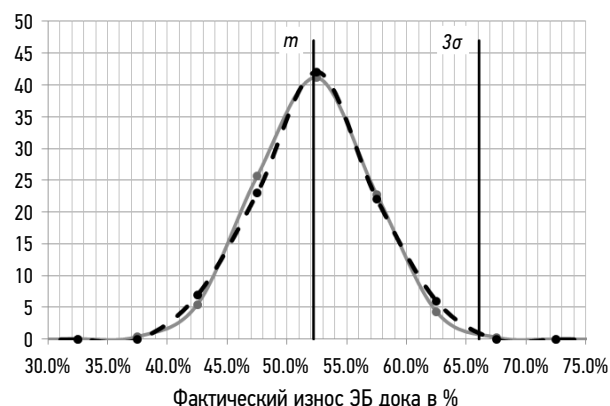


Рис. 6. Нормативный износ поперечного сечения монолитного дока грузоподъемностью 12 000 т для общей продольной прочности.  
Fig. 6. Specified cross-sectional wear of a cast-in-place dock with a carrying capacity of 12,000 tons for overall longitudinal strength.

## ОБОСНОВАНИЕ НОРМАТИВНОГО ИЗНОСА КОНСТРУКЦИЙ ПЛАВУЧЕГО ДОКА В ТРЕБОВАНИЯХ К ОБЩЕЙ ПРОЧНОСТИ И УСТОЙЧИВОСТИ

Таким образом, в (2) требуемый момент сопротивления поперечного сечения к концу срока службы дока ( $W'$ ) будет соответствовать не 100%-ному износу ЭБ, а экспериментально оцененному в настоящей работе, и с ошибкой в безопасную сторону можно принять равным 70%. Такой подход повлечет за собой пересмотр уровня допустимых напряжений.

В условии устойчивости (3), предлагается, что расчетные сжимающие напряжения ( $\sigma_{ci}$ ) должны быть определены с учетом износа поперечного сечения дока, соответствующего 70%, при этом ( $\sigma_e$ ) эйлеровы напряжения  $i$ -го элемента ЭБ должны определяться при условии 100%-го износа рассматриваемого элемента.

Настоящие изменения позволят существенно смягчить действующие требования Правил РМРС к общей прочности и устойчивости при продольном изгибе дока.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По результатам анализа нормативного износа поперечного сечения корпуса плавучего дока с применением специальной методики, основанной на случайном моделировании скоростей износов с использованием датчиков случайных чисел, были получены результаты, которые показали:

- математическое ожидание принимает значения в диапазоне: от 50 до 54%;
- стандартное отклонение принимает значения в диапазоне: 4–5%.

Тогда с вероятностью 99,7% нормативный износ эквивалентного бруса дока, участвующего в общем продольном изгибе, на конец срока службы может быть принят 65–70%.



## ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ИНФОРМАЦИЯ

**Вклад авторов.** Все авторы внесли существенный вклад в разработку концепции и методологии организации расчетов, реализацию расчетной части и подготовку статьи, прочли и одобрили финальную версию перед публикацией. Личный вклад каждого автора: Д.Т. Иванова — разработка методологии, реализация расчетов, анализ результатов; В.Н. Тряскин — разработка концепции и методологии.

**Источники финансирования.** Авторы заявляют об отсутствии внешнего финансирования при проведении исследования.

**Конфликт интересов.** Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией настоящей статьи.

## ADDITIONAL INFO

**Author contributions.** All authors made substantial contributions to the conceptualization, investigation, and manuscript preparation, and reviewed and approved the final version prior to publication. Personal contribution: D.T. Ivanova: methodology, investigation, formal analysis; V.N. Tryaskin: conceptualization, methodology.

**Funding sources.** The authors declare no external funding was received for conducting the study.

**Disclosure of interests.** The authors have no explicit or potential conflicts of interest associated with the publication of this article.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Правила классификации и постройки морских судов. Ч. II. Корпус. Российский Морской Регистр Судоходства. М.: Минтранс, 2024.
2. Тряскин В.Н. Проектирование конструкций корпуса плавучего дока по требованиям к общей прочности. В кн.: Регистр СССР: науч.-техн. сб. М.: Транспорт, 1991. Вып. 18. С. 3–18.
3. Отчет по научно-исследовательской работе. Ч. I. Обоснование требований Правил Регистра СССР по корпусу металлических плавучих доков. Л.: ЛКИ, 1964.
4. Лам Ван Хунг. Методические основы, алгоритмы и программное обеспечение задач проектирования и контроля технического состояния конструкций корпуса судна. дисс. ... канд. техн. наук. Санкт-Петербург, 2007.
5. Р 50.1.037-2002 Рекомендации по стандартизации. Прикладная статистика, Правила проверки согласия опытного распределения с теоретическим. Ч. II. Непараметрические распределения. М.: Госстандарт России, 2002.

6. Мицель А.А. Прикладная математическая статистика. Томск: ТУСУР, 2019. EDN: TSMVGT

7. Бородина А.В., Некрасова П.С. Статистические критерии в анализе данных. Петрозаводск: ПетрГУ, 2023.

8. Гмурман В.Е. Теория вероятностей и математическая статистика. М.: Высшая школа, 2003. ISBN: 5-06-004214-6 EDN: QJLKXP

9. Шилова З.В., Шилов О.И. Теория вероятностей и математическая статистика. Киров: ВГУ, 2015. ISBN: 978-5-906172-62-4 EDN: UGPGCP

10. Екимов В.В. Вероятностные методы в строительной механике корабля. Л.: Судостроение, 1966.

## REFERENCES

1. Rules for the classification and construction of sea-going vessels. Part II. Hull. Russian Maritime Register of Shipping. Moscow: MinTrans, 2024. (In Russ.)
2. Tryaskin V.N. Design of floating dock hull structures based on overall strength requirements. In: *USSR Register: scientific and technical collection*. Moscow: Transport; 1991;18:3-18. (In Russ.)
3. Report on research work. Part I. Justification of the requirements of the USSR Register Rules for the hull of metal floating docks. Leningrad: LKI; 1964.
4. Lam Van Hung. Methodological principles, algorithms and software for designing and monitoring the technical condition of ship hull structures. [dissertation]. Saint Petersburg; 2007. (In Russ.)
5. R 50.1.037-2002 Recommendations for standardization. Applied statistics, Rules for checking the agreement of the experimental distribution

with the theoretical one. Part II Nonparametric Distributions. Moscow: Gosstandart; 2002. (In Russ.)

6. Mitsel AA. *Applied Mathematical Statistics*. Tomsk: TUSUR; 2019. (In Russ.) EDN: TSMVGT

7. Borodina AV, Nekrasova RS. *Statistical Criteria in Data Analysis*. Petrozavodsk: PetrSU; 2023. (In Russ.)

8. Gmurman VE. *Probability Theory and Mathematical Statistics*. Moscow: Vysshaya shkola; 2003. (In Russ.) ISBN: 5-06-004214-6 EDN: QJLKXP

9. Shilova ZV, Shilov OI. *Probability Theory and Mathematical Statistics*. Kirov: VGGU; 2015. (In Russ.) ISBN: 978-5-906172-62-4 EDN: UGPGCP

10. Ekimov VV. *Probabilistic Methods in Ship Structural Mechanics*. Leningrad: Sudostroenie; 1966. (In Russ.)

## ОБ АВТОРАХ

\*Дианна Тимофеевна Иванова, старший преподаватель кафедры конструкции и технической эксплуатации судов, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет; адрес: Россия, 190121, Санкт-Петербург, ул. Лоцманская, 3; eLibrary SPIN: 1314-7682; e-mail: D.T.Ivanova@smtu.ru

Владимир Николаевич Тряскин, д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедры конструкции и технической эксплуатации судов, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет; eLibrary SPIN: 7663-8210; e-mail: vladimir.tryaskin@smtu.ru

## AUTHORS' INFO

\*Dianna T. Ivanova, Senior Lecturer at the Department of Ship Design and Technical Operation, Saint Petersburg State Marine Technical University; address: 3 Lotsmanskaya st, Saint Petersburg, 190121, Russia; eLibrary SPIN: 1314-7682; e-mail: D.T.Ivanova@smtu.ru

Vladimir N. Tryaskin, Dr. Sci. (Engineering), Professor, Head of the Department of Ship Design and Technical Operation, Saint Petersburg State Marine Technical University; eLibrary SPIN: 7663-8210; e-mail: vladimir.tryaskin@smtu.ru

\* Автор, ответственный за переписку / Corresponding author

Оригинальное исследование

УДК 621.438

DOI: [https://doi.org/10.52899/24141437\\_2025\\_02\\_189](https://doi.org/10.52899/24141437_2025_02_189)

EDN: YPBHKS

# Использование критериев подобия при анализе результатов натурных испытаний современных газотурбинных двигателей; введение мощностного параметра

П.Н. Коок<sup>1</sup>, В.В. Поярков<sup>2</sup><sup>1</sup> Санкт-Петербургский государственный морской технический университет, Санкт-Петербург, Россия;<sup>2</sup> АО «Невский завод», Санкт-Петербург, Россия

## АННОТАЦИЯ

**Актуальность.** С усложнением газотурбинных установок получили распространение методы обработки результатов испытаний газотурбинных двигателей, основанные не на принципах подобия, а на использовании математических моделей газотурбинных двигателей и карт климатических характеристик. При этом сложилось мнение, что методы, основанные на приведенных параметрах, устарели или имеют ограниченное применение только для газотурбинных двигателей простейших конструкций. В настоящей работе показано, что выводы теории подобия режимов можно успешно применять для решения некоторых практических инженерных задач для современных газотурбинных установок.

**Цель работы** — рассмотреть возможность применения методов теории подобия для обработки результатов испытаний и анализа работы современных газотурбинных установок. Предложить модернизированные безразмерные комплексы.

**Методы.** Для анализа возможностей использования приведенных характеристик газотурбинных установок были выполнены соответствующие расчеты переменных режимов на разработанной и верифицированной по результатам натурных испытаний термодинамической модели газотурбинных установок со свободной силовой турбиной при различных температурах наружного воздуха.

**Результаты.** На основе расчетов переменных режимов на математической модели газотурбинных установок произведен анализ применимости существующих типовых приведенных характеристик газотурбинных установок и соответствующих безразмерных комплексов. Предложен модернизированный безразмерный комплекс — мощностной параметр, проиллюстрированы возможности его инженерного применения.

**Выводы.** На основании вариантных расчётов на математической модели газотурбинных установок показано, что на основе мощностного параметра можно представлять результаты испытаний при произвольных условиях в удобной представимой форме, даже если подобие режимов в традиционном виде не соблюдается. Применение мощностного параметра позволяет проводить непрерывную оценку номинальной мощности газотурбинных установок на произвольном фактическом режиме её работы в целях непрерывной диагностики технического состояния.

**Ключевые слова:** критерии подобия; мощностной параметр; испытания газотурбинных двигателей; газотурбинный двигатель; математическая модель; теория подобия; режимы работы газотурбинных установок.

## Как цитировать

Коок П.Н., Поярков В.В. Использование критериев подобия при анализе результатов натурных испытаний современных газотурбинных двигателей; введение мощностного параметра // Труды Санкт-Петербургского государственного морского технического университета. 2025. Т. 4, № 2. С. 189–196. DOI: 10.52899/24141437\_2025\_02\_189 EDN: YPBHKS

Original study article

DOI: [https://doi.org/10.52899/24141437\\_2025\\_02\\_189](https://doi.org/10.52899/24141437_2025_02_189)

EDN: YPBHKS

# Similarity Tests Used to Analyze Field Tests of State-of-the-Art Gas Turbine Engines: Introducing Power Parameter

Petr N. Kook<sup>1</sup>, Victor V. Poyarkov<sup>2</sup><sup>1</sup> Saint Petersburg State Marine Technical University, Saint Petersburg, Russia;<sup>2</sup> JSC Nevsky Zavod, Saint Petersburg, Russia

## ABSTRACT

**BACKGROUND:** With the increasing complexity of gas turbine units, processing of gas turbine engine (GTE) test results have become a frequent practice. However, the methods are mostly based on mathematical GTE models and climatic reference maps rather than the principles of similarity. In this case, it is believed that that methods based on the specified parameters are outdated or their application is limited to only the simplest gas turbine engine designs. This paper shows that the similarity theory of modes can be successfully applied to solve some real-life engineering problems for state-of-the-art gas turbine units.

**AIM:** To consider application of similarity theory methods to process test results and analyze the operation of state-of-the-art gas turbine units and to propose advanced dimensionless groups.

**METHODS:** To analyze the possible use of the reduced gas turbine unit (GTU) parameters, we calculated the corresponding variable modes using a thermodynamic GTU model with a free power turbine developed and verified based on field tests at various outside air temperatures.

**RESULTS:** Calculations of variable modes based on a mathematical GTU model were used to analyze the applicability of existing standard reduced GTU parameters and the corresponding dimensionless groups. The authors propose an advanced dimensionless group (a power parameter) and show its possible engineering applications.

**CONCLUSIONS:** Variant calculations based on a mathematical GTU model show that it is possible to present the outcomes of tests in arbitrary conditions in a convenient representable form based on the power parameter, even if the conventional similarity of modes is not achieved. The power parameter allows for continuous testing of the rated GTU power in any actual operating mode for continuous monitoring of its status.

**Keywords:** similarity tests; power parameter; gas turbine engine tests; gas turbine engine; mathematical model; similarity theory; gas turbine operating modes.

## To cite this article

Kook PN, Poyarkov VV. Similarity Tests Used to Analyze Field Tests of State-of-the-Art Gas Turbine Engines: Introducing Power Parameter. *Transactions of the Saint Petersburg State Marine Technical University*. 2025;4(2):189–196. DOI: 10.52899/24141437\_2025\_02\_189 EDN: YPBHKS

Submitted: 26.02.2025

Accepted: 03.04.2025

Published online: 30.06.2025

## ВВЕДЕНИЕ

Параметры процессов, протекающих в элементах газотурбинных двигателей, работающих по разомкнутому циклу, существенным образом зависят от температуры и давления атмосферного воздуха. Номинальные показатели газотурбинных двигателей обычно приводятся для нормальных внешних условий по ГОСТ Р 52200-2004, или для других спецификационных условий, указываемых в договоре на поставку.

Однако, испытания двигателя приходится проводить при различных давлении и температуре атмосферного воздуха. Отсюда возникает необходимость применения соответствующей методики проведения испытаний ГТД и обработки их результатов.

В качестве основы для разработки таких методов используется теория подобия. Сущность её использования базируется на допущении существования подобных режимов при произвольных внешних условиях. Таким образом, при выполнении условий подобия опытные значения параметров можно пересчитать на номинальные (спецификационные) атмосферные условия.

Из теории подобия известно, что подобными являются процессы одной физической природы, имеющие подобные условия однозначности и равные одноименные определяющие критерии, то есть безразмерные комплексы, составленные из величин, входящих в условия однозначности.

С усложнением газотурбинных установок получили распространение методы обработки результатов испытаний ГТД, основанные не на принципах подобия, а на использовании математических моделей ГТД и карт климатических характеристик. При этом сложилось мнение, что методы, основанные на приведенных параметрах, устарели или имеют ограниченное применение только для ГТД простейших конструкций.

В настоящей работе будет показано, что выводы теории подобия режимов можно успешно применять для решения некоторых практических инженерных задач для современных газотурбинных установок.

## ПРИВЕДЕННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ГАЗОТУРБИНЫХ УСТАНОВОК

Из принципа подобия следует, что если одноименные критерии, подсчитанные по параметрам двух режимов работы двигателя, оказываются равными, то эти режимы подобны.

Подход к анализу ГТУ с определением приведенных параметров состоит в предположении, что любому режиму работы ГТУ при произвольной температуре наружного воздуха всегда найдется подобный ему режим при спецификационной температуре.

В сложившейся инженерной практике приведения параметров ГТУ к нормальным (спецификационным) условиям, согласно теории подобия, применяются следующие соотношения [1]:

$$N_e^{пр} = N_e \cdot \frac{P_{a_0}}{P_a} \cdot \sqrt{\frac{T_{1к_0}}{T_{1к}}}, \quad (1)$$

$$G_{тг}^{пр} = G_{тг} \cdot \frac{P_{a_0}}{P_a} \cdot \sqrt{\frac{T_{1к_0}}{T_{1к}}} \cdot \frac{(Q_M + h_{тг})}{Q_{M_0}}, \quad (2)$$

$$n^{пр} = n \cdot \sqrt{\frac{T_{1к_0}}{T_{1к}}}, \quad (3)$$

где  $N_e$  — мощность ГТУ на валу силовой турбины;  $N_e^{пр}$  — приведенная мощность ГТУ на валу силовой турбины;  $G_{тг}$  — расход топливного газа;  $G_{тг}^{пр}$  — приведенный расход топливного газа;  $n$  — частота вращения роторов ГТУ;  $n^{пр}$  — приведенная частота вращения роторов ГТУ;  $P_a$  — атмосферное давление;  $P_{a_0}$  — атмосферное давление при нормальных условиях, 101,3кПа;  $T_{1к}$  — абсолютная температура воздуха на входе в ОК;  $T_{1к_0}$  — температура воздуха на входе в ОК при нормальных условиях, 288,15 К;  $Q_M$  — массовая низшая теплота сгорания ТГ;  $h_{тг}$  — относительная энтальпия ТГ;  $Q_{M_0}$  — массовая низшая теплота сгорания ТГ при нормальных условиях, 50 МДж/кг.

Для однозначного определения режима работы двигателя необходимо задать, в том числе, параметры состояния и физические свойства атмосферного воздуха, а также физические свойства рабочего тела во всех элементах двигателя, которые характеризуются газовой постоянной  $R$ , показателем адиабаты  $k$ , коэффициентами вязкости и теплопроводностью [2].

Одним из основных факторов, влияющих на параметры рабочего тела, является влажность атмосферного воздуха.

Так, в [3] показано, что расчет параметров ГТД по традиционным формулам приведения без учета влажности приводит к заметным погрешностям и может затруднить отладку двигателя.

Однако на практике учет изменения свойств рабочего тела осложнен тем, что рабочее тело в компрессоре и турбине ГТУ разные, и имеют разный характер зависимости их свойств от температуры.

В сложившейся инженерной практике при использовании приведенных характеристик ГТУ изменением свойств рабочего тела было принято пренебрегать. В настоящей работе используются приведенные параметры в традиционно принятой форме.

## ОГРАНИЧЕНИЯ ПРИМЕНИМОСТИ МЕТОДОВ ПОДОБИЯ РЕЖИМОВ В ГАЗОТУРБИНЫХ УСТАНОВКАХ

Основными факторами, вызывающими искажения подобия режимов являются:

- изменение теплофизических свойств воздуха и продуктов сгорания;

- изменение зазоров в проточной части (изменение КПД ОК и турбины);
- положение поворотных лопаточных аппаратов компрессоров и турбин;
- отбор воздуха за ОК на ПОС или переменный отбор (сброс) воздуха на иные нужды ГТУ агрегата или станции.

Первые два фактора могут быть учтены введением соответствующих поправок к приведенным параметрам в зависимости от температуры наружного воздуха.

Учет влияния поворотных лопаточных венцов компрессоров и турбин зависит от конструкции ГТУ и программы регулирования.

Для режимов с отбором циклового воздуха требуется определение величины его расхода (измерение или расчетная оценка) и введение соответствующих поправок, позволяющих привести параметры режима с отбором к условиям без отбора воздуха.

Вместе с тем необходимо отметить, что искажения условий подобия, вносимые перечисленными выше факторами, не означают исключения возможности использования характеристик ГТУ, построенных в приведенных параметрах. Такие искажения по-разному влияют на изменение (расслоение) различных приведенных характеристик ГТУ (некоторые расслаиваются сильнее, некоторые слабее). И при введении необходимых корректирующих поправок отдельные приведенные характеристики вполне могут применяться в практических целях с приемлемыми погрешностями.

## АНАЛИЗ ТИПОВЫХ ПРИВЕДЕННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ГАЗОТУРБИННЫХ УСТАНОВОК

Для анализа возможностей использования приведенных характеристик ГТУ были выполнены соответствующие

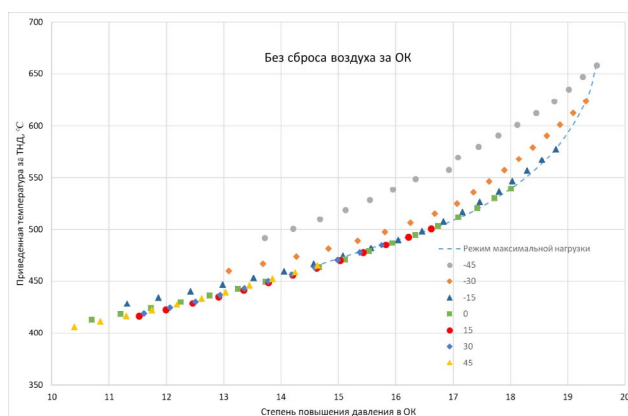


Рис. 1. Зависимость приведенной температуры за ТНД от степени повышения давления ОК (без сброса воздуха за ОК).

Fig. 1. Relationship between the reduced temperature past the low pressure turbine (LPT) and the degree of the axial compressor (AC) pressure increase (without air discharge past the AC).

расчеты переменных режимов на разработанной и верифицированной по результатам натурных испытаний термодинамической модели ГТУ со свободной силовой турбиной при различных температурах наружного воздуха.

В расчетах учитывалось изменение теплофизических свойств воздуха и продуктов сгорания. Влияние нарушения геометрического подобия (тепловых расширений) не учитывалось.

Расчеты были выполнены для двух возможных вариантов работы ГТУ: без сброса циклового воздуха после осевого компрессора, и с переменным сбросом циклового воздуха за осевым компрессором, в зависимости от режима работы ГТУ, согласно штатному алгоритму САУ.

В соответствии с широко распространенной практикой для построения приведенных характеристик ГТУ в качестве аргумента выбрана степень повышения давления в ОК. На рис. 1 показана зависимость приведенной температуры за ТНД от степени сжатия ОК для случая без сброса воздуха за осевым компрессором.

На рис. 2 показана зависимость приведенной температуры за ТНД от степени сжатия ОК при наличии сброса воздуха за осевым компрессором.

Из рис. 1, 2 видно, что без сброса воздуха за ОК и положительных температурах наружного воздуха точки практически точно ложатся на одну кривую (расслоение составляет примерно  $\pm 1^\circ\text{C}$ ). Но при низких температурах расслоение становится уже очень существенным.

А при работе ГТД со штатным сбросом воздуха за ОК говорить о какой-либо единой приведенной характеристике вообще не приходится.

## ВВЕДЕНИЕ МОЩНОСТНОГО ПАРАМЕТРА

В практике Невского завода для определения мощности ГПА в условиях эксплуатации широко использовались

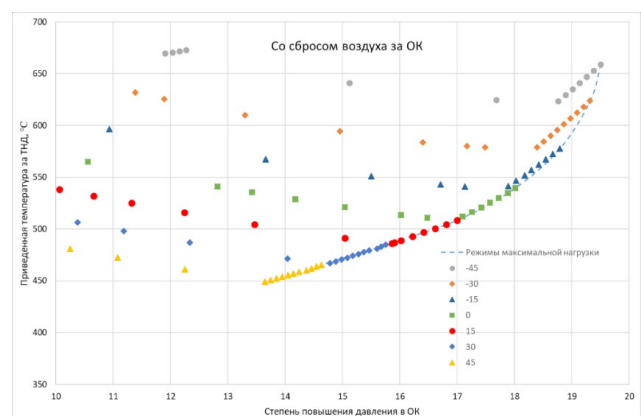


Рис. 2. Зависимость приведенной температуры за ТНД от степени повышения давления ОК (со сбросом воздуха за ОК).

Fig. 2. Relationship between the reduced temperature past the low pressure turbine (LPT) and the degree of the axial compressor (AC) pressure increase (with air discharge past the AC).

мощностные характеристики ГТУ, построенные на базе, так называемого, мощностного параметра [5]:

$$\frac{N_e}{P_{2\text{ТНД}} \cdot \sqrt{T_{2\text{ТНД}}}} = f(\pi_T).$$

Из баланса мощностей по турбине низкого давления (силовой турбине) вытекает следующее соотношение:

$$\frac{N_e}{P_{2\text{ТНД}} \cdot \sqrt{T_{2\text{ТНД}}}} = \left( \frac{G_{1\text{ТНД}} \cdot \sqrt{T_{1\text{ТНД}}}}{P_{1\text{ТНД}}} \right)^{1 + \frac{k_{\text{ТНД}} - 1}{2k_{\text{ТНД}}} \cdot \eta_{\text{ТНД}}^{\text{пол}}} \times \times_{\text{СР ТНД}} \cdot \left( 1 - \pi_{\text{ТНД}}^{\frac{k_{\text{ТНД}} - 1}{k_{\text{ТНД}}}} \right) \cdot \eta_{\text{ТНД}}.$$

Поскольку расходный параметр ТНД является практически однозначной функцией степени понижения давления в ТНД, получается, что мощностной параметр турбины является функцией степени расширения ТНД с точностью до изменения КПД ТНД. А степень понижения давления в ТНД в свою очередь является практически однозначной функцией степени понижения давления во всей турбине. При этом, если рассматривать ГТУ с простым выхлопом (без дополнительных теплообменников), то допустимо в качестве аргумента в мощностной характеристике использовать степень повышения давления в цикле ГТД, определенного как отношение абсолютного давления за ОК к атмосферному давлению.

Так, в настоящей работе рассмотрен мощностной параметр турбины как функция степени повышения давления  $\frac{P_{2\text{К}}}{P_{\text{атм}}}$ :

$$\frac{N_e}{P_{\text{атм}} \cdot \sqrt{T_{2\text{ТНД}}}} = f(\pi_K). \tag{7}$$

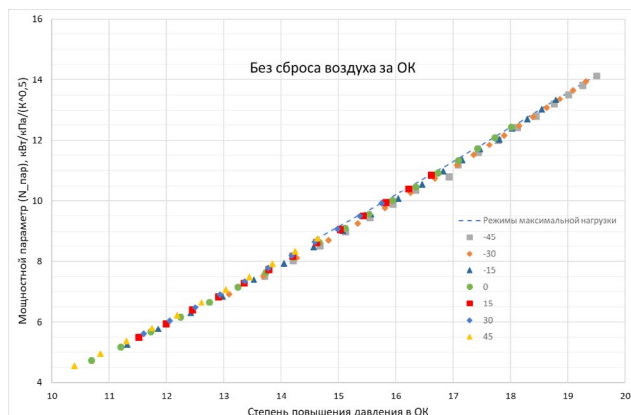


Рис. 3. Зависимость мощностного параметра от степени повышения давления при переменных оборотах ТНД ( $\text{КПД}_{\text{ТНД}} \approx \text{const}$ ).  
Fig. 3. Relationship between the power parameter and the degree of pressure increase at variable LPT speeds ( $\text{КПД}_{\text{ТНД}} \approx \text{const}$ ).

В исходной методике [5] формула расчета мощностного параметра не учитывала влияние изменения оборотов ТНД  $n_{\text{ТНД}}$ . Это в некоторой степени справедливо для реальных условий работы нагнетателя на линейной компрессорной станции, когда можно предположить примерно кубическую зависимость мощности нагнетателя от оборотов  $N \sim n^3$ , а следовательно  $\frac{u}{c_0} \approx \text{const}$ , а значит изменением КПД ТНД можно пренебречь.

На основе серии расчетов, проведенных на математической модели ГТУ, получена зависимость мощностного параметра, посчитанного по (7), от степени повышения давления (рис. 3).

Как видно из рис. 3, полученная зависимость мощностного параметра турбины от степени повышения давления оказалась устойчивой к внешним возмущениям.

На практике соотношение  $N \sim n^3$  выполняется далеко не всегда, например, в условиях работы приводимого компрессора на ГПЗ. В реальных условиях эксплуатации КПД ТНД не является постоянной величиной, а меняется на режимах в соответствии с изменением параметра  $u/c$  ТНД.

Для того чтобы показать влияние учета изменения КПД ТНД на зависимость мощностного параметра турбины от степени повышения давления в ОК были проведены серии расчетов на математической модели ГТУ. При этом частота вращения ТНД была принята постоянной (номинальной), что приводило к изменению параметра  $u/c$  ТНД, а соответственно и КПД ТНД, при изменении режима работы ГТУ.

На рис. 4 представлена зависимость мощностного параметра от степени повышения давления при постоянных оборотах ТНД.

Из рис. 4 видно, что зависимость мощностного параметра от степени повышения давления при постоянных оборотах ТНД начинает существенно расслаиваться. Среднеквадратичное отклонение разброса точек относительно средней линии составляет 2,5%.

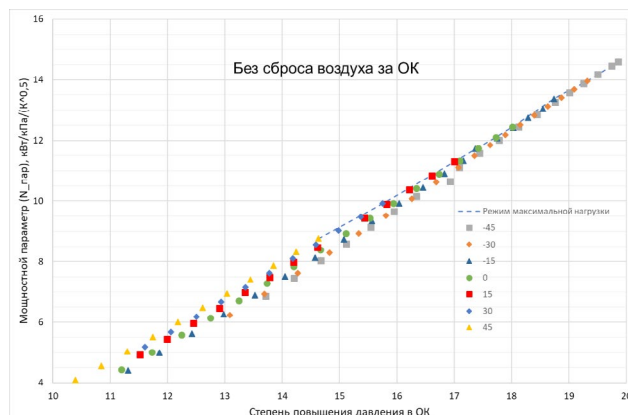


Рис. 4. Зависимость мощностного параметра от степени повышения давления ОК при фиксированных оборотах ТНД ( $\text{КПД}_{\text{ТНД}} \neq \text{const}$ ).  
Fig. 4. Relationship between the power parameter and the degree of AC pressure increase at fixed LPT speeds ( $\text{КПД}_{\text{ТНД}} \neq \text{const}$ ).

## Мощностной параметр с поправкой на обороты ТНД

Для учета изменения КПД ТНД при определении мощностного параметра турбины, например, при анализе результатов испытаний, предлагается ввести соответствующую поправку:

$$\vartheta_{n_{\text{ТНД}}} = 1 + \alpha \cdot \delta n_{\text{ТНД}}^{\beta}.$$

Величина поправки  $\vartheta_{n_{\text{ТНД}}}$  зависит от отклонения фактической частоты вращения ТНД от оптимальной для данного режима работы ГТУ.

Как правило, ТНД ГТУ проектируется так, чтобы номинальная частота вращения находилась вблизи оптимума КПД, поэтому оптимальную частоту вращения на переменных режимах приблизительно можно оценить из следующего соотношения:

$$n_{\text{ТНД}}^{\text{пр}} \approx n_{\text{ТНД}}^{\text{ном}} \cdot \sqrt[3]{\frac{N_e^{\text{пр}}}{N_e^{\text{ном}}}}.$$

Переменный сброс воздуха за ОК на частичных режимах приводит к относительному повышению располагаемого теплоперепада в ТНД примерно пропорционально доле сбрасываемого воздуха  $\delta H_0^{\text{ТНД}} \sim \delta G_{\text{сброс}}$ .

С учетом данного обстоятельства оптимальная частота вращения ТНД на частичных режимах рассчитывалась по следующему уравнению:

$$n_{\text{ТНД}}^{\text{опт}} = n_{\text{ТНД}}^{\text{ном}} \cdot \sqrt{\frac{T_{1\text{К}}}{T_{1\text{К}0}}} \cdot \sqrt[3]{\frac{N_e^{\text{пр}}}{N_e^{\text{ном}}}} \cdot \sqrt{(1 + \delta G_{\text{сброс}})}.$$

По результатам численного анализа на математической модели получены следующие значения коэффициентов:  $\alpha=1,3$ ,  $\beta=2$ .

Как видно из рис. 5, введение предложенной поправки на обороты ТНД значительно уменьшает разброс точек,

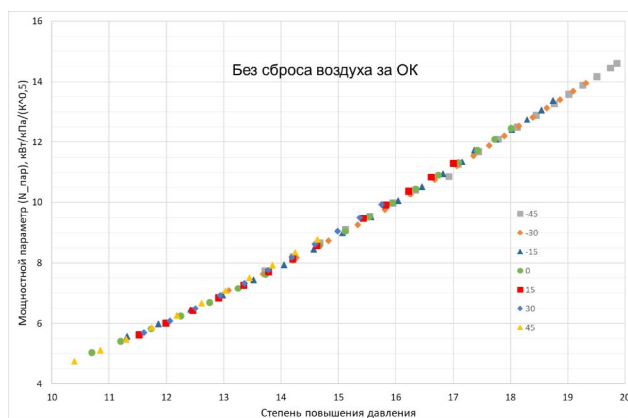


Рис. 5. Зависимость мощностного параметра с поправкой  $\vartheta_{n_{\text{ТНД}}}$  от степени повышения давления.

Fig. 5. Relationship between the adjusted power parameter  $\vartheta_{n_{\text{ТНД}}}$  and the degree of pressure increase.

все они ложатся на одну линию. Среднеквадратичное отклонение разброса точек относительно средней линии составляет 0,6%.

## ИЛЛЮСТРАЦИЯ ВОЗМОЖНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ МОЩНОСТНОГО ПАРАМЕТРА

При рассмотрении мощностного параметра в [4] отмечалось, что он существенным образом зависит от состояния проточной части, изменения КПД компрессора, расходной характеристики турбины.

Однако, исследования на модели показали, что мощностной параметр, особенно с внесением корректирующих поправок, оказался устойчив не только к внешним условиям, но и к изменению КПД проточных частей компрессора и турбин, а также к переменному сбросу воздуха за ОК. Это обстоятельство позволяет использовать подходы теории подобия и мощностной параметр для практических инженерных целей при испытаниях и диагностики ГТУ.

Целесообразность описанного подхода можно продемонстрировать на математической модели ГТУ. В табл. 1 представлены основные параметры ГТУ, полученные на трех произвольно выбранных режимах работы при произвольно выбранной температуре наружного воздуха  $-17^\circ\text{C}$ .

Режим 1 — режим полной нагрузки, режим 2 — частичный режим, режим 3 — частичный режим, при котором был намеренно заметно снижен КПД осевого компрессора.

Рассмотренные произвольные режимы не являются подобными — они имеют разное значение угла входного направляющего аппарата ОК, а также различную величину сброса воздуха за ОК. На режиме 3 принудительно занижен КПД осевого компрессора.

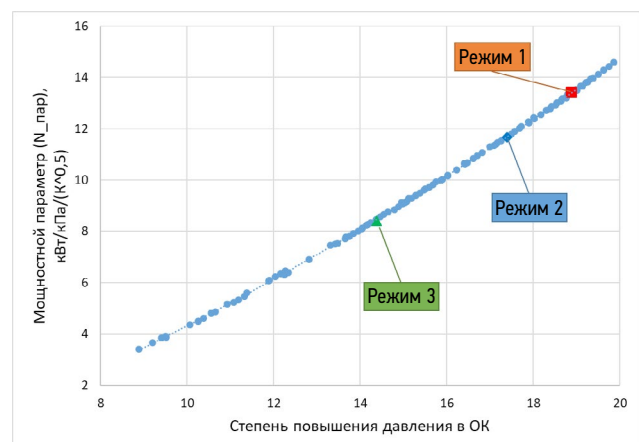


Рис. 6. Зависимость мощностного параметра на произвольных режимах ГТУ от степени повышения давления в ОК.

Fig. 6. Relationship between the power parameter at arbitrary GTU modes and the degree of AC pressure increase.

Таблица 1. Основные параметры ГТУ на произвольных режимах

Table 1. Main GTU parameters in arbitrary modes

Номер режима	1	2	3
Температура перед ОК, °С	–17	–17	–17
Температура перед ТВД, °С	1204	1124	1124
Положение ВНА ОК, град	2,7	0,6	–11,4
КПД ОК, %	79,2	82,4	78
Степень повышения давления ОК	18,9	17,4	14,4
Относительный обороты ТНД, %	105,5	99,9	90,1
Мощность на валу ТНД, МВт	37,5	31,9	23,4
Сброс воздуха за ОК, кг/с	0	1,8	4,6
Мощностной параметр, кВт/кПа/К <sup>0.5</sup>	13,4	11,7	8,4

Представленные в табл. 1 значения мощностного параметра и степени повышения давления в ОК для режимов 1–3 нанесены на график (рис. 6). На этот же график нанесены все точки (зависимости мощностного параметра от степени повышения давления в ОК), полученные на математической модели ГТУ в широком диапазоне температур наружного воздуха и режимов работы, с учетом поправки на частоту вращения ТНД.

Как видно из рис. 6, несмотря на сильные отличия рассмотренных режимов (изменение режима работы, изменение КПД осевого компрессора), зависимость мощностного параметра от степени повышения давления в ОК для этих режимов с высокой точностью ложится на одну линию.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основе рассчитанного мощностного параметра можно проводить оценку мощности ГТУ, когда нет других средств измерения, а также использовать как альтернативное средство контроля корректности определения мощности по крутящему моменту (ИКМ) или по нагнетателю.

Применение методик на основе мощностного параметра позволяет представлять результаты испытаний при произвольных условиях в удобной представимой форме, даже если подобие режимов в традиционном виде не соблюдается.

На основе этого можно, в том числе, проводить непрерывную оценку номинальной мощности ГТУ на

произвольном фактическом режиме её работы в целях непрерывной диагностики технического состояния.

## ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ИНФОРМАЦИЯ

**Вклад авторов.** П.Н. Коок — поиск публикаций по теме статьи, написание текста рукописи, создание изображений; В.В. Поярков — редактирование текста рукописи, экспертная оценка, утверждение финальной версии. Все авторы одобрили рукопись (версию для публикации), а также согласились нести ответственность за все аспекты работы, гарантируя надлежащее рассмотрение и решение вопросов, связанных с точностью и добросовестностью любой её части.

**Источники финансирования.** Авторы заявляют об отсутствии внешнего финансирования при проведении исследования.

**Конфликт интересов.** Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией настоящей статьи.

**Генеративный искусственный интеллект.** При создании настоящей статьи технологии генеративного искусственного интеллекта не использовались.

## ADDITIONAL INFO

**Author contributions:** P.N. Kook: investigation, writing—original draft, visualization; V.V. Poyarkov: writing—review & editing. All the authors approved the version of the manuscript to be published and agreed to be accountable for all aspects of the work, ensuring that questions related to the accuracy or integrity of any part of the work are appropriately investigated and resolved.

**Funding sources:** The study was not supported by any external sources.

**Disclosure of interests:** The authors have no explicit or potential conflicts of interests associated with the publication of this article.

**Generative AI:** No generative artificial intelligence technologies were used to prepare this article.



## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Методические указания по проведению теплотехнических и газодинамических расчетов при испытаниях газотурбинных газоперекачивающих агрегатов. М.: ВНИИГАЗ, 1999.
2. Дондошанский В.К., Дергач В.Ф., Либенсон М.Н. Расчет и испытание проточной части газотурбинного двигателя. М.: Машиностроение, 1972.
3. Горюнов И.М. Оценка влияния влагосодержания воздуха на параметры ГТД // Вестник самарского государственного аэрокосмического университета им. ак. С.П. Королёва. 2006. № 2-1(10). С. 154–156. EDN: IPJAMP
4. Корневский Л.Г. Газотурбинный агрегат ГТК-10 Определение эффективной мощности газотурбинной установки в эксплуатационных условиях. Л.: Производственное объединение «Невский завод» имени В.И. Ленина, Научно-исследовательский конструкторско-технологический институт, 1979.
5. Методика по определению мощности газотурбинных установок ГТ-700-5, ГТ-750-6, ГТК-10 в эксплуатационных условиях на компрессорных станциях ТМ-3/40-69. Работа № 806. НЗЛ; 1969.

## REFERENCES

1. *Guidelines for conducting heat engineering and gas dynamic calculations during testing of gas turbine gas pumping units.* Moscow: VNIIGAZ; 1999. (In Russ.)
2. Dondoshansky VK, Dergach VF, Libenson MN. *Calculation and testing of the flow path of a gas turbine engine.* Moscow: Mashinostroenie, 1972. (In Russ.)
3. Goryunov IM. Assessment of the influence of air moisture content on GTE parameters // *Bulletin of the Samara State Aerospace University named after ac. S.P. Korolev.* 2006;2-1(10):154–156. (In Russ.) EDN: IPJAMP
4. Korenevsky LG. *Gas turbine unit GTK-10 Determination of the effective power of a gas turbine plant under operating conditions.* Leningrad: Production Association "Nevsky Plant" named after V.I. Lenin, Research Design and Technology Institute; 1979. (In Russ.)
5. Methodology for determining the capacity of gas turbine units GT-700-5, GT-750-6, GTK-10 under operating conditions at compressor stations TM-3/40-69. Work No. 806. NZL. 1969. (In Russ.)

## ОБ АВТОРАХ

**\*Петр Николаевич Коок**, аспирант, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет; адрес: Россия, 190121, Санкт-Петербург, ул. Лоцманская, 3; eLibrary SPIN: 2920-9076; e-mail: peter.kook@yandex.ru

**Виктор Викторович Поярков**, главный специалист, АО «Невский завод»; e-mail: v-poyarkov@yandex.ru

## AUTHORS' INFO

**\*Petr N. Kook**, Postgraduate Student, Saint Petersburg State Marine Technical University; address: 3 Lotsmanskaya st, Saint Petersburg, 190121, Russia; eLibrary SPIN: 2920-9076; e-mail: peter.kook@yandex.ru

**Victor V. Poyarkov**, Chief Officer, JSC Nevsky Zavod; e-mail: v-poyarkov@yandex.ru

\* Автор, ответственный за переписку / Corresponding author

Оригинальное исследование

УДК 629.12:539.433

DOI: [https://doi.org/10.52899/24141437\\_2025\\_02\\_197](https://doi.org/10.52899/24141437_2025_02_197)

EDN: ONDEOI

# Влияние непризматичности трубопровода на параметры его вибрации

А.Л. Мелконян, Д.А. Николаев, С.А. Яремчук

Санкт-Петербургский государственный морской технический университет, Санкт-Петербург, Россия

## АННОТАЦИЯ

**Актуальность.** Многообразие видов трубопроводов, применяемых в различных областях техники, диктует необходимость учета возможной переменности их поперечных сечений, а также наличие установки опор, обладающих различной жесткостью. Желание учесть влияние указанных факторов, усложняющих картину вибрации таких трубопроводов, побудило авторов поставить перед собой соответствующую задачу.

**Цель работы** — исследование влияния непризматичности трубопровода на параметры его вибрации.

**Материалы и методы.** Представляемая работа отражает дальнейшее развитие подходов, использованных авторами в предыдущих статьях, посвященных разработке математической модели, алгоритма и программы расчета параметров вибрации призматического трубопровода, обладающего двумя упругими опорами, при движении по нему идеальной жидкости. Суть этих подходов состоит в конструировании для трубопровода конечно-элементной модели из базовых элементов, каждый из которых, в свою очередь, состоит из подэлементов, индуцирующих в процессе вибрации, соответствующие дополнительные усилия. Учет влияния дополнительных факторов потребовал введения в модель дополнительных подэлементов. Построение соответствующего алгоритма расчета, учитывающего наличие дополнительных элементов, опирается, как и прежде, на применение метода парциальных откликов, что позволяет выполнить принцип соответствия устойчивости рассматриваемого процесса и алгоритма расчета. Для разработанного алгоритма была составлена программа расчета, позволяющая получить параметры вибрации для прямолинейного многоопорного непризматического трубопровода.

**Результаты.** В качестве демонстрации работоспособности программы были выполнены расчеты параметров вибрации для нескольких многоопорных трубопроводов (призматического, а также обладающих средним участком с увеличенным и уменьшенным диаметром поперечного сечения). Выполненные расчеты позволили построить графики зависимости от диаметра выбранного участка трубопровода таких параметров, как первая собственная частота, критическая скорость, амплитуда опорной реакции, амплитуда поперечного смещения в середине наибольшего пролета; расчеты выполнялись для различных скоростей движения жидкости.

**Заключение.** Анализируя полученные графики, удалось оценить влияние указанных факторов на параметры вибрации трубопроводов. Результаты достаточно хорошо согласуются с представлениями о физике рассматриваемого процесса, а также подтверждают работоспособность разработанной программы.

**Ключевые слова:** парциальные отклики и параметры; параметры вибрации; квазиодномерная модель; квазистатическая аналогия.

## Как цитировать

Мелконян А.Л., Николаев Д.А., Яремчук С.А. Влияние непризматичности трубопровода на параметры его вибрации // Труды Санкт-Петербургского государственного морского технического университета. 2025. Т. 4, № 2. С. 197–206. DOI: 10.52899/24141437\_2025\_02\_197 EDN: ONDEOI

Original study article

DOI: [https://doi.org/10.52899/24141437\\_2025\\_02\\_197](https://doi.org/10.52899/24141437_2025_02_197)

EDN: ONDEOI

# Non-prismatic Pipelines and Their Vibration Parameters

Armen L. Melconian, Dmitriy A. Nikolaev, Sergey A. Yaremchuk

Saint Petersburg State Marine Technical University, Saint Petersburg, Russia

## ABSTRACT

**BACKGROUND:** The variety of pipeline types used in various fields of technology requires to consider their possible cross-sectional variability and supports with different rigidity. The authors set a corresponding problem to consider the influence of these factors complicating the vibration profile of such pipelines.

**AIM:** To study the influence of non-prismatic pipelines on their vibration parameters.

**MATERIALS AND METHODS:** The paper further develops the approaches used by the authors in previous publications on the development of a mathematical model, algorithm, and a program used to calculate the vibration parameters of a prismatic pipeline with two resilient supports and perfect liquid flowing in it. These approaches essentially provide for building a finite element pipeline model using basic elements, where each element consists of subelements that induce corresponding additional forces during vibration. To consider the influence of additional factors, we introduced additional subelements to the model. The corresponding calculation algorithm is based on additional elements and, as before, on the partial response method, allowing to implement the principle of conformity of the stability of the process under consideration and the calculation algorithm. For the developed algorithm, we developed a calculation program to determine vibration parameters of a rectilinear multi-support non-prismatic pipeline.

**RESULTS:** To demonstrate the program's functionality, vibration calculations were performed for several multi-support pipelines (a prismatic pipeline and those with a middle section with increased and reduced cross-sectional diameter). The calculations allowed to construct dependence graphs of parameters, including the fundamental frequency, critical speed, support reaction amplitude, and transverse displacement amplitude in the middle of the largest span, in relation to the diameter of the selected pipeline section; the calculations were performed for different fluid flow rates.

**CONCLUSION:** Analysis of the graphs allowed to determine the influence of the specified factors on the pipeline vibration. The results are in good agreement with the concepts of physics of the process under consideration and confirm the reliability of the developed program.

**Keywords:** partial responses and parameters; vibration; quasi-one-dimensional model; quasi-static analogy.

## To cite this article

Melconian AL, Nikolaev DA, Yaremchuk SA. Non-prismatic Pipelines and Their Vibration Parameters. *Transactions of the Saint Petersburg State Marine Technical University*. 2025;4(2):197–206. DOI: 10.52899/24141437\_2025\_02\_197 EDN: ONDEOI

## ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время очень важно оценивать вибрацию конструкций, так как она негативно сказывается на их эксплуатации. Помимо собственных частот необходимо также исследовать параметры вибрации (амплитуды смещений, внутренние усилия, опорные реакции), так как их величины определяют усталостную прочность. До недавнего времени не существовало программного комплекса отечественной разработки, позволяющего достаточно просто и быстро готовить исходные данные и выполнять расчеты указанных параметров вибрации в трубопроводе. Известны лишь аналитические решения [1–5], для некоторых достаточно простых частных случаев.

В предыдущих работах авторами настоящей статьи были созданы: математическая модель [6–9], алгоритм [10] и программа расчёта параметров вибрации [11], которая позволяет вычислять параметры вибрации в многоопорном прямолинейном непризматическом трубопроводе.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ

### Физическая модель

Физическая модель трубопровода представляет собой плоскую квазиодномерную дискретную систему, являющуюся частным случаем модели, приведенной в [6, 11]. Она является совокупностью последовательно соединённых элементов, состоящих из инерционного тела, обладающего массой, моментом инерции и центром тяжести, двух абсолютно жёстких стержней и заключённого между ними шарнира деформации. Применение квазистатической аналогии позволяет вместо динамики движения рассматривать процесс статической деформации безынерционной квазиодномерной дискретной модели, состоящей из безынерционных элементов, соединённых между собой и неподвижным основанием упругими связями, каждая из которых порождает усилия определенной структуры — пропорциональные смещению, скорости и ускорению. Внешние и внутренние сопротивления учитываются комплексностью инерционно-жесткостных характеристик модели.

Обобщенные шарниры деформаций допускают сдвиг в поперечном и продольном направлениях, а также изгиб относительно бинормали.

### Математическая модель

Прежде чем перейти к расчёту, стоит напомнить о проделанных ранее этапах работы.

В предыдущих работах [9, 10] была получена формула для инерциальной нагрузки в виде:

$$q(x, t) = -m_1 \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} - m_2 \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} - m_2 U^2 \frac{1}{\rho} - m_2 2U \dot{\vartheta}. \quad (1)$$

Следует заметить, что в (1) первое слагаемое — сила инерции элемента трубы, возникающая при его поперечных колебаниях; второе — сила инерции переносного движения элемента жидкости; третье — нормальная составляющая сила инерции относительного движения (центробежная сила); четвёртое — сила инерции Кориолиса.

Кроме того, было выведено дифференциальное уравнение поперечных колебаний оси трубопровода относительно начального прямолинейного положения:

$$EJ \frac{\partial^4 w}{\partial x^4} + (m_1 + m_2) \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} + m_2 U^2 \frac{1}{\rho} + m_2 2U \dot{\vartheta} = 0. \quad (2)$$

Анализ уравнения (2) позволяет сделать следующие выводы. Для расчета параметров установившихся колебаний трубопровода можно воспользоваться плоским вариантом прямолинейной квазиодномерной модели, если выполнить коррекцию некоторых ее характеристик и ее модификацию (оснащение свойствами, ранее отсутствовавшими).

### Коррекция и модификация математической модели

В соответствии с методом, предложенным в [7], рассмотрим и разделим на группы нагрузки, действующие на базовую плоскую квазиодномерную модель.

К первой группе отнесем слагаемые, которые можно учесть коррекцией внешней нагрузки, прикладываемой к квазистатической модели (в данной работе такие нагрузки отсутствуют).

Ко второй группе относят слагаемые, прямо пропорциональные абсолютным и (или) относительным смещениям, скоростям и ускорениям, действие которых можно учесть коррекцией существующих инерционно-жесткостных характеристик квазиодномерной модели.

К третьей группе относят слагаемые, прямо пропорциональные абсолютным и (или) относительным смещениям, скоростям и ускорениям, действие которых можно учесть модификацией инерционно-жесткостных характеристик квазиодномерной модели (иными словами — оснастить модель новыми, ранее отсутствовавшими у нее, свойствами).

К четвёртой группе — слагаемые, которые учитываются непосредственно при выводе формул для парциальных откликов и парциальных параметров при “прохождении” подэлемента длиной  $l$ .

В [8, 9] были выведены формулы для парциальных откликов (ПО) и парциальных параметров (ПП) для второго и четвертого слагаемых из (2), а в [10] — для третьего слагаемого, в результате чего удалось избавиться от выполнения последовательных приближений. Выражения для ПО и ПП представляют собой математическую модель задачи, полученную методом парциальных откликов в его дискретном варианте [5, 6, 11]. Для полученной математической была разработана усовершенствованная программа расчёта параметров вибрации трубопровода [10], учитывающая автоматически влияние всех вышеуказанных факторов.

## Цель работы

Цель работы — оценить влияние непрямолинейности трубопровода на параметры его вибрации.

Для исследования были взяты 5 трёхпролётных четырёхопорных трубопровода (рис. 1):

- Трубопровод №1 — непрямолинейный прямолинейный трубопровод диаметром 20 мм с уменьшенным диаметром сечения в середине 10 мм.
- Трубопровод №2 — непрямолинейный прямолинейный трубопровод диаметром 20 мм с уменьшенным диаметром сечения в середине 15 мм.
- Трубопровод №3 — прямолинейный прямолинейный трубопровод диаметром 20 мм.
- Трубопровод №4 — непрямолинейный прямолинейный трубопровод диаметром 20 мм с увеличенным диаметром сечения в середине 25 мм.
- Трубопровод №5 — непрямолинейный прямолинейный трубопровод диаметром 20 мм с увеличенным диаметром сечения в середине 30 мм.

Все пять трубопроводов изготовлены из стали плотностью  $7800 \text{ кг/м}^3$  с модулем упругости  $2,1 \cdot 10^{11} \text{ Па}$ , плотность протекающей жидкости  $1000 \text{ кг/м}^3$  для каждого трубопровода. Толщина всех трубопроводов равна 1 мм.

Все трубопроводы длиной 3 м состоят из равных пролётов по одному метру. На левом и правом пролётах диаметр всех трубопроводов равен 20 мм. В срединном пролёте на отрезке величиной 0,7 м трубопроводы имеют разный диаметр — 10 мм, 15 мм, 20 мм, 25 мм, 30 мм (рис. 1), он находится на расстоянии 0,15 м от опор.

Ко всем трубопроводам приложена гармонически изменяющаяся во времени сила  $P$ , амплитудное значение которой равно 50 Н; сила приложена на расстоянии одной трети метра от крайней левой опоры (рис. 1). Жёсткости опор в поперечном направлении приняты  $10^9 \text{ Н/м}$ .

Задача численного исследования для всех трубопроводов — найти критические скорости и первые собственные частоты при скорости движения жидкости 0, 10, 20

и 30 м/с, а также амплитуды параметров вибрации в характерных точках.

Ниже расчетным путем найдены параметры вибрации всех трубопроводов при частотах вынуждающего воздействия, соответствующих 0,5 и 0,75 значения их первых собственных частот, определенных для указанных выше скоростей жидкости на входе в трубопровод.

## Решение в программе «Трубопровод-2»

Расчёт проводился в программе «трубопровод-2», которая позволяет вычислять параметры вибрации в непрямолинейном прямолинейном многоопорном трубопроводе.

Все пять трубопроводов были смоделированы в программе «Трубопровод-2» с описанными выше начальными данными.

На рис. 2, 4 для примера показаны модели трубопровода № 2 — непрямолинейного с зауженным диаметром сечения в середине равным 15 мм и трубопровода № 4 — непрямолинейного с увеличенным диаметром сечения в середине равным 25 мм соответственно.

Кроме того, на рис. 3, 5 представлены окна ввода начальных данных для трубопроводов № 2 и № 4 соответственно.

Далее, были найдены критические скорости движения жидкости, представленные в таблице 1.

Для всех трубопроводов были найдены первые собственной частоты и их значения, умноженные на коэффициент 0,5 и 0,75 при скоростях 0 м/с (табл. 2), 10 м/с (табл. 3), 20 м/с (табл. 4) и 30 м/с (табл. 5).

После чего, были найдены параметры вибрации в средней части среднего пролета в точке  $x = 1,511 \text{ м}$  при новых значениях частоты вынуждающего воздействия. В табл. 6 и 7 представлены вертикальные смещения (прогибы) при частоте вынуждающего воздействия 0,5 и 0,75 от первой собственной частоты  $\lambda$  соответственно.

По полученным значениям, представленным в таблицах 6, 7 были построены графики зависимости вертикальных

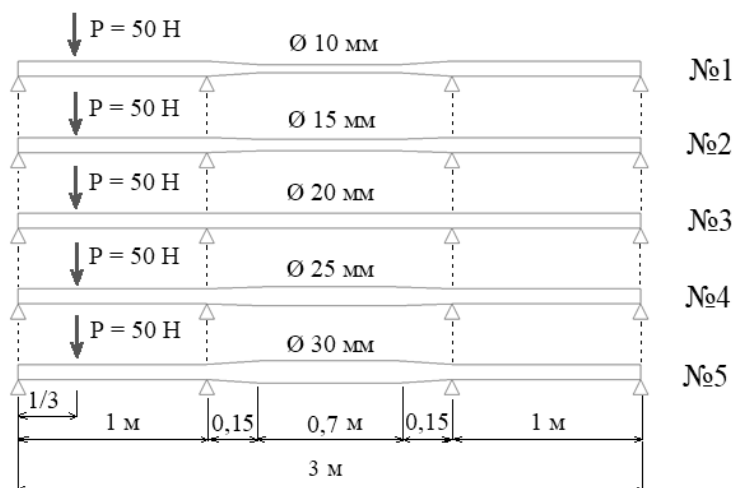


Рис. 1. Схема моделей трубопроводов.  
Fig. 1. Pipeline model structure.

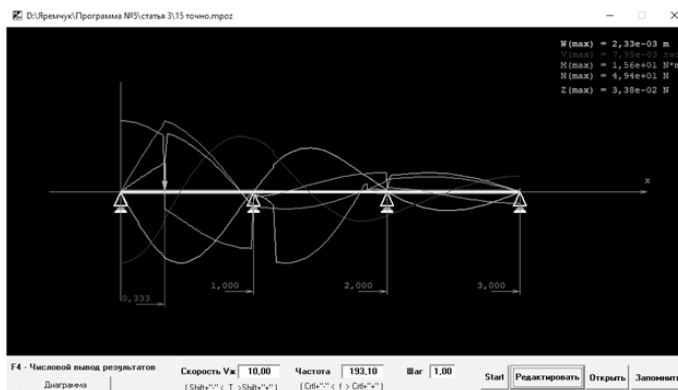


Рис. 2. Модель трубопровода №2.  
Fig. 2. Pipeline model 2.

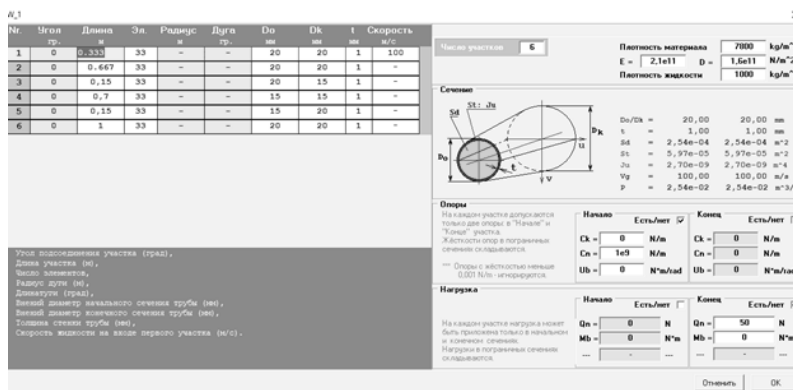


Рис. 3. Окно ввода начальных данных для трубопровода №2.  
Fig. 3. Input entry window for pipeline 2.

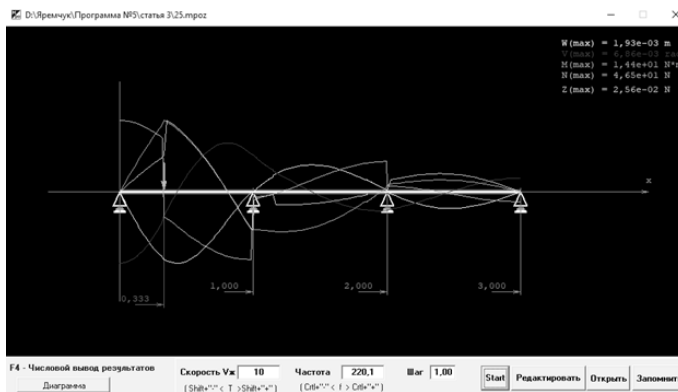


Рис. 4. Модель трубопровода №4.  
Fig. 4. Pipeline model 4.

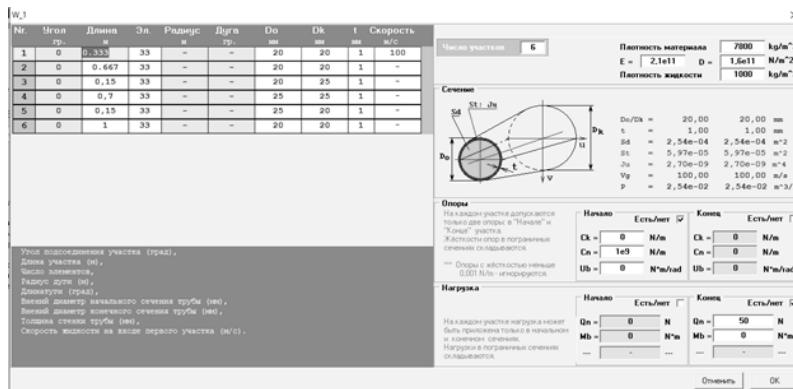


Рис. 5. Окно ввода начальных данных для трубопровода №4.  
Fig. 5. Input entry window for pipeline 4.

смещений от диаметра сечения трубопровода в срединной части — 10, 15, 20, 25, 30 мм, при различных скоростях движения жидкости — 0, 10, 20, 30 м/с (рис. 6).

В табл. 8 и 9 представлены значения поперечных сил при частоте вынуждающего воздействия 0,5 и 0,75 от первой собственной частоты  $\lambda$  соответственно.

По полученным в результате расчёта значениям, представленным в табл. 8, 9 были построены графики зависимости поперечных сил от диаметра сечения трубопровода в срединной части — 10, 15, 20, 25, 30 мм, при различных скоростях движения жидкости — 0, 10, 20, 30 м/с (рис. 7).

**Таблица 1.** Значения критических скоростей

**Table 1.** Critical speeds

Трубопроводы	№1	№2	№3	№4	№5
$V_{кр}$ , м/с	47	103	148	172	184

**Таблица 2.** Значения первой собственной частоты при скорости жидкости 0 м/с

**Table 2.** Fundamental frequency at fluid velocity of 0 m/s

Трубопроводы	№1	№2	№3	№4	№5
$\lambda$ , рад/с	253,0	259,0	274,0	294,0	316,0
0,5 $\cdot\lambda$ , рад/с	126,5	129,5	137,0	147,0	158,0
0,75 $\cdot\lambda$ , рад/с	189,8	194,3	205,5	220,5	237,0

**Таблица 3.** Значения первой собственной частоты при скорости жидкости 10 м/с

**Table 3.** Fundamental frequency at fluid velocity of 10 m/s

Трубопроводы	№1	№2	№3	№4	№5
$\lambda$ , рад/с	249,4	257,4	273,0	293,5	314,9
0,5 $\cdot\lambda$ , рад/с	124,7	128,7	136,5	146,8	157,5
0,75 $\cdot\lambda$ , рад/с	187,0	193,0	204,8	220,1	236,2

**Таблица 4.** Значения первой собственной частоты при скорости жидкости 20 м/с

**Table 4.** Fundamental frequency at fluid velocity of 20 m/s

Трубопроводы	№1	№2	№3	№4	№5
$\lambda$ , рад/с	237,8	254,0	271,1	292,1	313,7
0,5 $\cdot\lambda$ , рад/с	118,9	127,0	135,6	146,1	156,9
0,75 $\cdot\lambda$ , рад/с	178,4	190,5	203,3	219,0	235,3

**Таблица 5.** Значения первой собственной частоты при скорости жидкости 30 м/с

**Table 5.** Fundamental frequency at fluid velocity of 30 m/s

Трубопроводы	№1	№2	№3	№4	№5
$\lambda$ , рад/с	213	248,2	267,9	289,7	311,5
0,5 $\cdot\lambda$ , рад/с	106,5	124,1	134	144,9	155,8
0,75 $\cdot\lambda$ , рад/с	159,8	186,2	200,9	217,3	233,6

Также были вычислены значения опорных реакций на второй опоре от левого конца трубопровода в точке  $x = 1$  м при частоте вынуждающего воздействия 0,5 и 0,75 от первой собственной частоты  $\lambda$ , полученные значения представлены в табл. 10 и 11 соответственно.

По полученным значениям, представленным в таблицах 10, 11 были построены графики зависимости опорных реакций от диаметра сечения трубопровода в срединной части — 10, 15, 20, 25, 30 мм, при различных скоростях движения жидкости — 0, 10, 20, 30 м/с (рис. 8).

**Таблица 6.** Вертикальные смещения (прогибы) при частоте вынуждающего воздействия 0,5 $\cdot\lambda$ , мм

**Table 6.** Vertical displacements (deflections) at forcing frequency of 0,5 $\cdot\lambda$ , mm

Трубопроводы	№1	№2	№3	№4	№5
0,5 $\cdot\lambda$ при $V_{ж} = 0$ м/с	1,80	1,59	1,54	1,33	1,26
0,5 $\cdot\lambda$ при $V_{ж} = 10$ м/с	1,81	1,60	1,55	1,33	1,27
0,5 $\cdot\lambda$ при $V_{ж} = 20$ м/с	1,85	1,62	1,56	1,35	1,28
0,5 $\cdot\lambda$ при $V_{ж} = 30$ м/с	1,95	1,66	1,59	1,37	1,29

**Таблица 7.** Вертикальные смещения (прогибы) при частоте вынуждающего воздействия 0,75 $\cdot\lambda$ , мм

**Table 7.** Vertical displacements (deflections) at forcing frequency of 0,75 $\cdot\lambda$ , mm

Трубопроводы	№1	№2	№3	№4	№5
0,75 $\cdot\lambda$ при $V_{ж} = 0$ м/с	2,67	2,33	2,31	1,92	1,85
0,75 $\cdot\lambda$ при $V_{ж} = 10$ м/с	2,68	2,33	2,31	1,93	1,85
0,75 $\cdot\lambda$ при $V_{ж} = 20$ м/с	2,70	2,35	2,33	1,94	1,86
0,75 $\cdot\lambda$ при $V_{ж} = 30$ м/с	2,88	2,40	2,37	1,98	1,89

**Таблица 8.** Поперечная сила при частоте вынуждающего воздействия 0,5 $\cdot\lambda$ , Н $\cdot 10^1$

**Table 8.** Transverse force at forcing frequency of 0,5 $\cdot\lambda$ , Н $\cdot 10^1$

Трубопроводы	№1	№2	№3	№4	№5
0,5 $\cdot\lambda$ при $V_{ж} = 0$ м/с	3,79	3,58	3,52	3,35	3,31
0,5 $\cdot\lambda$ при $V_{ж} = 10$ м/с	3,81	3,59	3,53	3,36	3,32
0,5 $\cdot\lambda$ при $V_{ж} = 20$ м/с	3,85	3,62	3,57	3,39	3,35
0,5 $\cdot\lambda$ при $V_{ж} = 30$ м/с	3,94	3,69	3,63	3,44	3,40

**Таблица 9.** Поперечная сила при частоте вынуждающего воздействия  $0,75 \cdot \lambda, N \cdot 10^1$

**Table 9.** Transverse force at forcing frequency of  $0,75 \cdot \lambda, N \cdot 10^1$

Трубопроводы	№1	№2	№3	№4	№5
0,75·λ при Vж = 0 м/с	5,35	4,94	4,98	4,63	4,73
0,75·λ при Vж = 10 м/с	5,33	4,94	4,98	4,65	4,72
0,75·λ при Vж = 20 м/с	5,31	4,98	5,03	4,69	4,75
0,75·λ при Vж = 30 м/с	5,25	5,06	5,11	4,77	4,80

**Таблица 11.** Опорные реакции при частоте вынуждающего воздействия  $0,75 \cdot \lambda, N$

**Table 11.** Support reaction at forcing frequency of  $0,75 \cdot \lambda, N$

Трубопроводы	№1	№2	№3	№4	№5
0,75·λ при Vж = 0 м/с	36,3	36,9	38,1	40,8	44,3
0,75·λ при Vж = 10 м/с	34,8	36,2	38,1	41,0	44,2
0,75·λ при Vж = 20 м/с	29,9	35,4	38,1	41,0	44,5
0,75·λ при Vж = 30 м/с	19,0	34,1	38,2	41,3	44,9

**Таблица 10.** Опорные реакции при частоте вынуждающего воздействия  $0,5 \cdot \lambda, N$

**Table 10.** Support reaction at forcing frequency of  $0,5 \cdot \lambda, N$

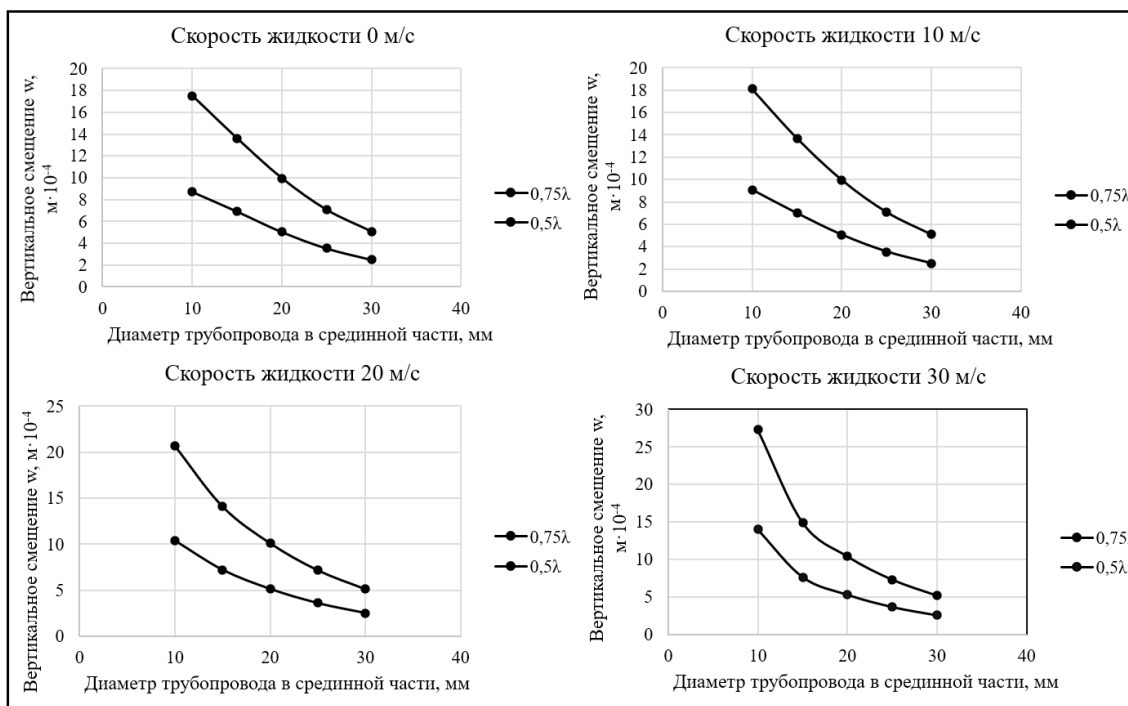
Трубопроводы	№1	№2	№3	№4	№5
0,5·λ при Vж = 0 м/с	24,8	30,0	30,6	32,6	34,4
0,5·λ при Vж = 10 м/с	24,3	28,2	30,6	32,8	34,4
0,5·λ при Vж = 20 м/с	22,6	27,8	30,7	32,8	34,6
0,5·λ при Vж = 30 м/с	17,2	26,4	30,8	33,0	34,6

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате выполненного исследования для каждого из трубопроводов были найдены критические скорости, первые собственные частоты при различных скоростях движения жидкости и параметры вибрации (вертикальные смещения и поперечные силы).

Анализ результатов численного исследования показал, что при увеличении диаметра трубопровода критическая скорость жидкости и первая собственная частота трубопровода увеличиваются. При увеличении скорости движения жидкости значение первой собственной частоты уменьшается.

Анализируя полученные результаты, можно заключить, что при увеличении диаметра трубопровода параметры



**Рис. 6.** Графики зависимости вертикальных смещений от диаметра трубопровода.

**Fig. 6.** Dependence graphs (vertical displacement and pipeline diameter).



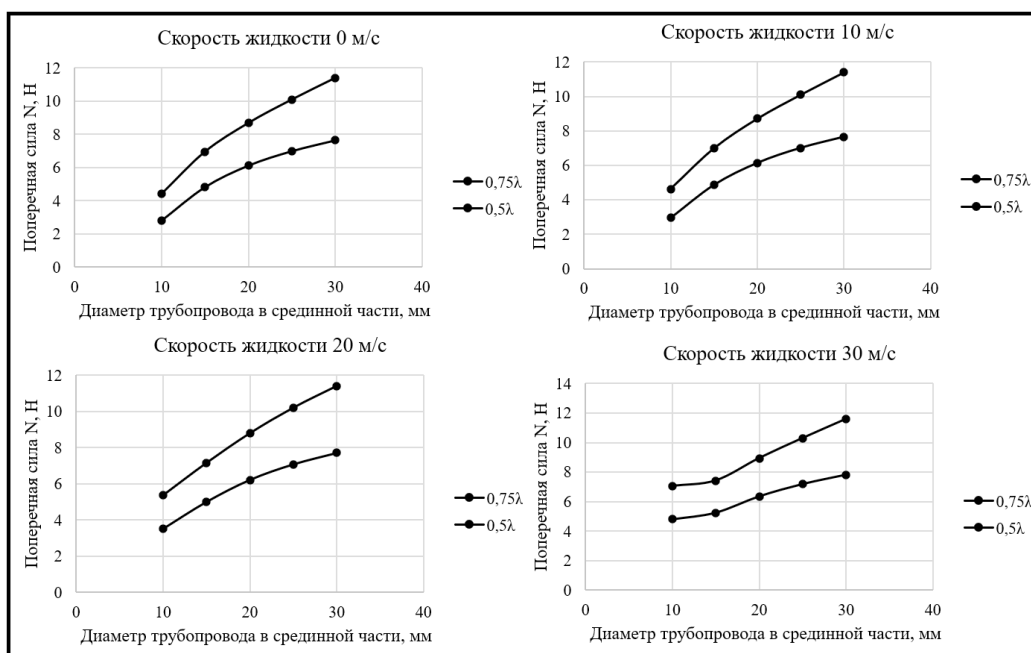


Рис. 7. Зависимости поперечных сил от диаметра трубопровода.  
Fig. 7. Relationships between transverse forces and pipeline diameter.

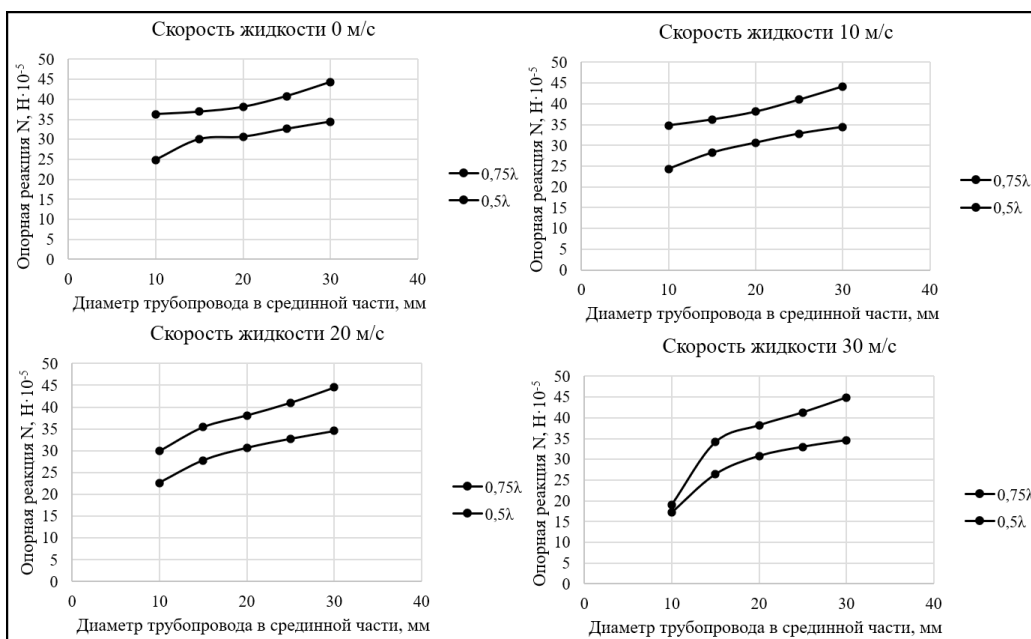


Рис. 8. Графики зависимости опорных реакций от диаметра трубопровода.  
Fig. 8. Dependence graphs (support reaction and pipeline diameter).

вибрации уменьшаются, это наглядно видно при частоте вынуждающего воздействия равной 0,5 и 0,75 от первой собственной частоты каждого из рассмотренных трубопроводов. Это обусловлено, на наш взгляд, увеличением жесткости трубопровода при увеличении диаметра его средней части.

## ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ИНФОРМАЦИЯ

**Вклад авторов.** Д.А. Николаев — создание расчётной программы; А.Л. Мелконян — поиск публикаций по теме статьи, анализ и создание

теоретического материала; С.А. Яремчук — участие в отладки программы расчёта, проведение расчётов, написание текста рукописи, создание изображений; А.Л. Мелконян — написание и редактирование текста рукописи; А.Л. Мелконян — экспертная оценка, утверждение финальной версии. Все авторы одобрили рукопись (версию для публикации), а также согласились нести ответственность за все аспекты работы, гарантируя надлежащее рассмотрение и решение вопросов, связанных с точностью и добросовестностью любой её части.

**Источники финансирования.** Авторы заявляют об отсутствии внешнего финансирования при проведении исследования.

**Конфликт интересов.** Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией настоящей статьи.

**Генеративный искусственный интеллект.** При создании настоящей статьи технологии генеративного искусственного интеллекта не использовались.

## ADDITIONAL INFO

**Author contributions:** D.A. Nikolaev: software; A.L. Melkonyan: investigation, formal analysis; writing—review & editing; S.A. Yaremchuk: software, validation, writing—original draft, visualization. All the authors approved

the version of the manuscript to be published and agreed to be accountable for all aspects of the work, ensuring that questions related to the accuracy or integrity of any part of the work are appropriately investigated and resolved.

**Funding sources:** The study was not supported by any external sources.

**Disclosure of interests:** The authors have no explicit or potential conflicts of interests associated with the publication of this article.

**Generative AI:** No generative artificial intelligence technologies were used to prepare this article.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Александров В.Л., Матлах А.П., Поляков В.И. Борьба с вибрацией на судах. Санкт-Петербург: Морвест, 2005. EDN: QNSOHV
2. Светлицкий В.А., Стасенко И.В. Сборник задач по теории колебаний. М.: Высшая школа, 1979.
3. Бидерман В.Л. Прикладная теория механических колебаний. М.: Высшая школа, 1972.
4. Давыдов В.В., Маттес Н.В. Динамические расчеты прочности судовых конструкций. Л.: Судостроение, 1974.
5. Чувиковский В.С. Численные методы расчетов в строительной механике корабля. Л.: Судостроение, 1976.
6. Мелконян А.Л., Николаев Д.А. Модификация инерционно-жестких характеристик модели как путь решения задач о ее установившихся колебаниях // Морские интеллектуальные технологии. 2020. № 1-3(47). С. 12–19. doi: 10.37220/MIT.2020.47.1.037 EDN: DWZCCE
7. Мелконян А.Л., Чулкин М.В. Алгоритм и программа расчёта параметров вибрации трубопровода с учётом протекания жидкости //

- Труды Крыловского государственного научного центра. 2020. № S2. С. 260–265. DOI: 10.24937/2542-2324-2020-2-S-1-260-265 EDN: BLPQOL
8. Мелконян А.Л., Николаев Д.А., Чулкин М.В. Расчёт параметров вынужденных установившихся колебаний трубопровода // Морские интеллектуальные технологии. 2021. № 1 (2). С. 51–59. doi: 10.37220/MIT.2021.51.1.025 EDN: WSAQAM
  9. Мелконян А.Л., Яремчук С.А. Модель и алгоритм расчёта параметров вибрации трубопровода методом парциальных откликов // Труды Санкт-Петербургского государственного морского технического университета. 2024. № 1(9). С. 90–100. EDN: NPZEOB
  10. Мелконян А.Л., Николаев Д.А., Яремчук С.А. Расчёт параметров вибрации трубопровода без выполнения последовательных приближений // Морские интеллектуальные технологии. 2024. № 3(65). С. 94–101. DOI: 10.37220/MIT.2024.65.3.012 EDN: XMYMPW
  11. Эффективное решение. Расчет изогнутых балок и рам. Санкт-Петербург, 2007. Дата обращения: 02.02.2024. Режим доступа: <http://www.d-nik.de>

## REFERENCES

1. Aleksandrov VL, Matlah AP, Poljakov VI. *Combating vibration on ships*. Sankt-Peterburg: Morvest; 2005. (In Russ.)
2. Svetlickij VA, Stasenko IV. *Collection of problems on the theory of oscillations*. Moscow: Vysshaja shkola; 1979. (In Russ.)
3. Biderman V.L. *Applied theory of mechanical vibrations*. Moscow: Visshaya shkola; 1972. (In Russ.)
4. Davidov VV, Mattes NV. *Dynamic strength calculations of ship structures*. Leningrad: Sudostroenie; 1974. (In Russ.)
5. Chuvikovskij VS. *Numerical methods of calculations in ship structural mechanics*. Leningrad: Sudostroenie, 1976. (In Russ.)
6. Melkonjan AL, Nikolaev DA. Modification of inertial-rigidity characteristics of a model as a way to solve problems about its steady-state oscillations. *Morskie intellektual'nye tehnologii*. 2020;1-3(47):12–20. (In Russ.) doi: 10.37220/MIT.2020.47.1.037 EDN: DWZCCE
7. Melkonjan AL, Chuklin MV. Algorithm and program for calculating pipeline vibration parameters taking into account the flow of liquid. *Trudy*

- Krylovskogo gosudarstvennogo nauchnogo centra*. 2020;2:260–265. (In Russ.) DOI: 10.24937/2542-2324-2020-2-S-1-260-265 EDN: BLPQOL
8. Melkonjan AL, Nikolaev DA, Chuklin MV. Calculation of parameters of forced steady-state vibrations of a pipeline. *Morskie intellektual'nye tehnologii*. 2021;1(2):51–59 (In Russ.) doi: 10.37220/MIT.2021.51.1.025 EDN: WSAQAM
  9. Melkonjan AL, Yaremchuk SA. Model and algorithm for calculating pipeline vibration parameters using the partial response method. *Trudy SPbGMTU*. 2024;1(9):90–100. (In Russ.)
  10. Melkonjan AL, Nikolaev DA, Yaremchuk SA. Calculation of pipeline vibration parameters without successive approximations. *Morskie intellektual'nye tehnologii*. 2024;3(65):94–101. (In Russ.) DOI: 10.37220/MIT.2024.65.3.012 EDN: XMYMPW
  11. Effective solution. Calculation of curved beams and frames. Saint Petersburg; 2007. Accessed: 17.11.2024. Available from: <http://www.d-nik.de> (In Russ.)

## ОБ АВТОРАХ

**Армен Левонович Мелконян**, канд. техн. наук, доцент, профессор кафедры теоретической механики и сопротивления материалов, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет; e-mail: mel1950@mail.ru

**Дмитрий Александрович Николаев**, канд. техн. наук, пенсионер; e-mail: D.Nikolaev@d-nik.de

**\*Сергей Александрович Яремчук**, студент магистратуры, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет; адрес: 190121, Санкт-Петербург, ул. Лоцманская, 3; e-mail: remeyak@yandex.ru

## AUTHORS' INFO

**Armen L. Melconian**, Cand. Sci (Engineering), Associated Professor, Professor of Theoretical Mechanics and Material Strength Department, Saint Petersburg State Marine Technical University; e-mail: mel1950@mail.ru

**Dmitriy A. Nikolaev**, Cand. Sci (Engineering), a pensioner; e-mail: D.Nikolaev@d-nik.de

**\*Sergey A. Yaremchuk**, master's student, Saint Petersburg State Marine Technical University; address: Lotsmanskaya, 3, Saint Petersburg, 190121, Russia; e-mail: remeyak@yandex.ru

---

\* Автор, ответственный за переписку / Corresponding author

Оригинальное исследование

УДК 620.178.16

DOI: [https://doi.org/10.52899/24141437\\_2025\\_02\\_207](https://doi.org/10.52899/24141437_2025_02_207)

EDN: BCQSCH

# Оценка трибологических свойств графитонаполненного полисульфона

Н.А. Поляков, С.Г. Чулкин

Санкт-Петербургский государственный морской технический университет, Санкт-Петербург, Россия

## АННОТАЦИЯ

**Актуальность.** Разработка антифрикционных материалов, для дейдвудных подшипников и технологий их изготовления, взамен импортных, позволит обеспечить устойчивое развитие отечественного судостроения и приблизит выполнение целей, поставленных Правительством РФ в стратегии развития судостроения. Так амбициозный проект ледокола «Лидер» мощностью 120 МВт и имеющий ледовый класс Icebreaker 9, направленный на освоение Северного морского пути требует применение антифрикционных вкладышей с высокими эксплуатационными свойствами. В условиях санкционного давления необходимо не только заменить импортные материалы, нужно превзойти их по механическим свойствам. В связи с этим актуальной является проблема разработки новых антифрикционных композитов с улучшенными механическими свойствами.

**Цель работы** — определить применимость графитонаполненного полисульфона в качестве антифрикционного материала для судовых дейдвудных подшипников.

**Материалы и методы.** Для проведения эксперимента был подготовлен композит и литьевые матрицы для получения образцов. В качестве материала сравнения был выбран капролон. Исследование проводилось на машине трения по принципу контакта «диск—брусок» с фиксацией следующих параметров: времени трения, частоты вращения вала (диска), силы воздействия вала на образец, измерения потребляемой мощности машины трения в процессе. Материалы, а также ширины лунки износа. На основании данных испытаний были определены параметры: глубина сегмента износа, момент трения, динамический коэффициент трения, линейный и весовой износ.

**Результаты.** В результате исследования трибологических свойств графитонаполненного полисульфона была получена математическая модель линейного износа ПСФ+10%С. Испытания проводились как для композита ПСФ+10%С, так и для капролона, принятого за эталон, что позволило определить относительную износостойкость композита, которая находится в диапазоне 0,08–0,33 для принятых условий эксперимента.

**Заключение.** Полученный материал ПСФ+10%С уступает капролону по износу и коэффициенту трения, а также коэффициенту относительной износостойкости. Результаты исследования не позволяют рекомендовать состав композита для применения в дейдвудных подшипниках, однако полученная математическая модель износа может найти применение в других областях науки и техники.

**Ключевые слова:** судостроение; испытание; трение; износ; полисульфон (ПСФ); углерод; композит; литьевая машина; литье под давлением; дейдвудные подшипники.

## Как цитировать

Поляков Н.А., Чулкин С.Г. Оценка трибологических свойств графитонаполненного полисульфона // Труды Санкт-Петербургского государственного морского технического университета. 2025. Т. 4, № 2. С. 207–214. DOI: [10.52899/24141437\\_2025\\_02\\_207](https://doi.org/10.52899/24141437_2025_02_207) EDN: BCQSCH

Original study article

DOI: [https://doi.org/10.52899/24141437\\_2025\\_02\\_207](https://doi.org/10.52899/24141437_2025_02_207)

EDN: BCQSCH

# Tribological Evaluation of Graphite-Reinforced Polysulfone

Nikita A. Polyakov, Sergey G. Chulkin

Saint Petersburg State Marine Technical University, Saint Petersburg, Russia

## ABSTRACT

**BACKGROUND:** The development of antifriction materials for stern tube bearings and their manufacturing to replace imported ones will ensure the sustainable development of national shipbuilding and allow to achieve the goals set by the Government of the Russian Federation to implement the shipbuilding development strategy. For example, the ambitious 120 MW Leader icebreaker (Icebreaker 9 Ice Class) project designed to develop the Northern Sea Route requires high performance antifriction liners. In the context of sanctions, it is required to both replace imported materials and surpass their mechanical properties. In this regard, the problem of developing new antifriction composites with improved mechanical properties is relevant.

**AIM:** To determine the applicability of graphite-reinforced polysulfone as an antifriction material for marine stern tube bearings.

**MATERIALS AND METHODS:** For the experiment, we used a composite and casting matrices to make test pieces. Caprolon was selected as the comparable material. The study was conducted on a tribometer using the disk and bar contact principle. We recorded the friction time, shaft (disk) rotation frequency, shaft force on the test piece, tribometer power consumption during the process, and crater wear width. The tests allowed to determine wear segment depth, friction torque, dynamic friction coefficient, and linear and weight wear.

**RESULTS:** The tribological evaluation of graphite-reinforced polysulfone allowed to develop a mathematical linear wear model of PSF+10%C. Tests were conducted both for the PSF+10%C composite and caprolon taken as a reference; they allowed to determine the relative wear resistance of the composite in the range of 0.08–0.33 for the given experimental conditions.

**CONCLUSION:** The resulting material PSF+10%C has poorer wear parameters, friction coefficient, and relative wear resistance coefficient compared to caprolon. The study does not allow us to recommend the composite for use in stern tube bearings. However, the resulting mathematical wear model may be used in other scientific and technology applications.

**Keywords:** shipbuilding; testing; friction; wear; polysulfone (PSF); carbon; composite; injection machine; die casting; stern tube bearings.

## To cite this article

Polyakov NA, Chulkin SG. Tribological Evaluation of Graphite-Reinforced Polysulfone. *Transactions of the Saint Petersburg State Marine Technical University*. 2025;4(2):207–214. DOI: [10.52899/24141437\\_2025\\_02\\_207](https://doi.org/10.52899/24141437_2025_02_207) EDN: BCQSCH

Submitted: 20.02.2025

Accepted: 03.04.2025

Published online: 26.06.2025

## ВВЕДЕНИЕ

Полисульфон — это неусиленный, аморфный полимер, который обладают стойкостью к воздействию высоких температур, гидролизу, химическому воздействию и пару. Полисульфоны устойчивы к радиационным воздействиям. Высока устойчивость полисульфонов к образованию трещин при высоких напряжениях вплоть до 150 °С. Предел текучести у них на 20–30% больше, чем у поликарбонатов и полиамидов. Для полисульфонов характерно постоянство диэлектрических свойств в широком диапазоне температур и частот [1].

Ранее проводились такие исследования как: трибологические свойства полимерных нанокомпозитов на основе полисульфона [2], исследование трибологических свойств композиционных покрытий на основе полисульфона [3], антифрикционность и антифрикционные свойства термостойких термопластов [4]. Помимо этого, проводились обширное изучение полисульфона с графитовым наполнением: влияние модификации функционализированными углеродными нанотрубками на свойства полисульфона [5], механические и проводящие свойства графитонаполненных композитов на основе полисульфона [6]. Однако исследований износостойкости графитонаполненного полисульфона не производилось. Данная композиция могла бы быть востребованной в судостроении, а именно, в дейдвудных подшипниках [7, 8], в случае получения антифрикционных свойств после добавления графита.

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ПРОЦЕССА ТРЕНИЯ

Для оценки трибологических характеристик композита ПСФ 150+С был выбран базовый материал ПСФ150

ТУ 6-06-6-88 с модификатором трения в виде графитового порошка ГИИ-А ТУ 1916-109-71-2009. Для определения относительного коэффициента износа, за эталон принят полиамид 6-блочным «Капролон» ТУ 2224-004-47921026-2016.

Для испытаний были разработаны и изготовлены литьевые матрицы, по которым были изготовлены образцы для испытаний. Отливка деталей происходит при помощи литьевой машины (рис. 1)

Для испытаний на износ была применена испытательная установка, представленная на рис. 2.

Оценка износостойкости материалов будет производиться с учетом снижении удельного давления на плоский образец по методике Л. В. Ефремова, А. В. Тикалова [9, 10].

По данной методике процесс испытаний происходит в течение времени  $T$ , при заданных частоте вращения  $n$  и нагрузке  $F$ , диск диаметром  $D$  врезается в брусок шириной  $H$ , образуя износ в виде сегмента площадью  $A$ . Длина хорды образованного сегмента измеряется под микроскопом.

Эскиз пары трения «диск—брусок», где диск 1 вырезает сегмент в бруске 2 показан на рис. 3.

Линейный  $h_l$  и весовой  $h_m$  износ рассчитываются соответственно по формулам

$$h_l = \frac{A}{L} = \frac{L^2}{12r}, \tag{1}$$

$$h_m = AH\gamma = h_l LH\gamma. \tag{2}$$

При сравнительном тестировании материалов на износостойкость назначается износостойкость эталонного материала. Для этого рассчитывается интенсивность изнашивания  $I = h_l/S$ , а износостойкость  $\varepsilon$  является величиной, обратной интенсивности изнашивания:

$$\varepsilon = \frac{1}{I} = \frac{S}{h_l}, \tag{3}$$

где  $S = \pi D_n T$  — путь трения.

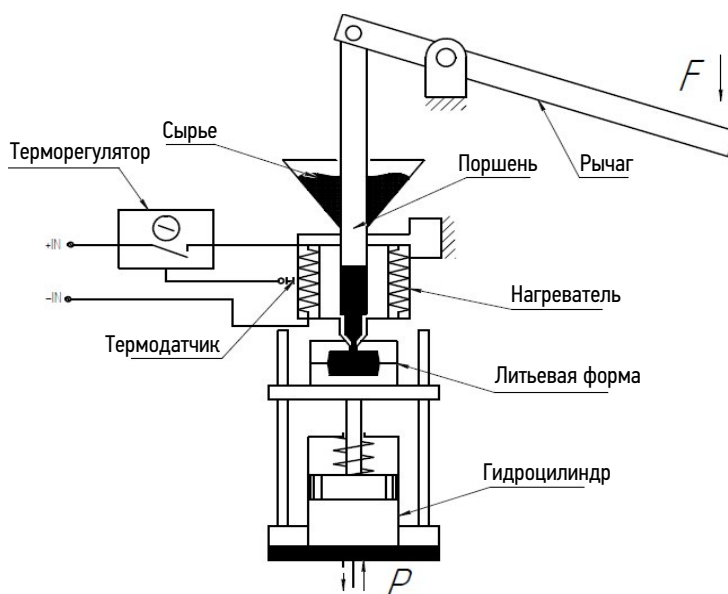


Рис. 1. Схема литьевой машины.  
Fig. 1. Injection machine diagram.

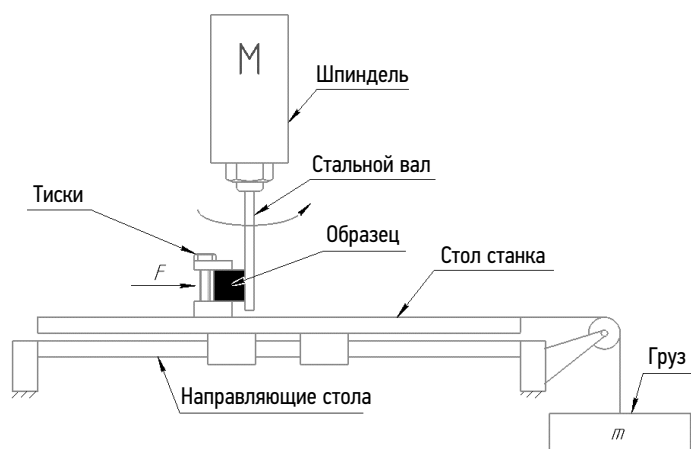


Рис. 2. Испытательная установка.  
Fig. 2. Test bench.

Относительная износостойкость материала  $\varepsilon'$  рассчитывается по формуле

$$\varepsilon' = \varepsilon / \varepsilon', \quad (4)$$

где  $\varepsilon'$  — износостойкость эталонного образца.

В настоящей работе при решении задачи определения износостойкости материалов удельное давление является вспомогательным показателем и в методике не учитывается. Основной динамический показатель — нагрузка  $F$ , таким образом, удельное давление определяется как:

$$P = \frac{F}{LH}. \quad (5)$$

Динамический коэффициент трения определялся по формуле:

$$f_{\text{тр}} = \frac{M_{\text{тр}}}{r \times P}, \quad (6)$$

где  $M_{\text{тр}}$  — момент трения, Н·м;  $r$  — радиус образца, м;  $P$  — действующая нагрузка.

Момент трения, возникающий при истирании образцов, определяют при помощи измерительного комплекта, который предназначен для измерений силы тока, напряжения и мощности в однофазных и трехфазных трехпроводных и четырехпроводных цепях переменного тока при равномерной и неравномерной нагрузках фаз.

Между мощностью и моментом существует зависимость

$$W = M_{\text{тр}} \times \omega, \quad (7)$$

где  $W$  — угловая скорость, рад/с.

В процессе эксперимента, когда вал машины трения входит в контакт с испытываемым образцом, в результате действия сил трения, повышается потребляемая мощность электродвигателя. Разница потребляемой

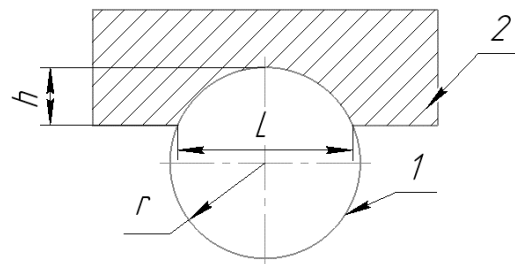


Рис. 3. Эскиз пары трения:  $h$  — глубина сегмента,  $L$  — длина хорды,  $r$  — радиус диска.

Fig. 3. Tribological situation layout:  $h$ , segment height;  $L$ , chord length;  $r$ , disk radius.

мощности машины трения при устоявшемся «холостом» режиме и потребляемой при работе с преодолением сил трения будет мощностью, потраченной на момент трения.

Тогда динамический коэффициент трения:

$$f_{\text{тр}} = \frac{\Delta W \times r \times P}{\omega}. \quad (8)$$

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ЭКСПЕРИМЕНТА

Во время эксперимента необходимо определение фактической частоты вращения вала в паре трения, установившейся в процессе эксперимента. Для выполнения данной задачи используется эффект стробоскопа, при совпадении частоты включений лампы или частоты кадров видеокамеры с частотой вращения вала, метка нанесенная на вращающийся вал «застывает». Окно программы с фиксацией частоты вращения вала при давлен на рис. 4.

Определение изменения потребляемой мощности оборудования для определения момента трения производится при помощи измерительного прибора, установленного перед в электрическую сеть перед потребителем.

Измерение износа образцов проводится при помощи цифрового микроскопа с увеличения 500x и метода искусственных баз.

## ПОДГОТОВКА КОМПОЗИТА

Композит подготавливается из гранул полисульфона марки ПСФ150 ТУ 6-06-6-88.

Для улучшения процесса гармонизации композита в процессе плавки, гранулы перемалываются в пластины на жерновой мельнице до средних размеров частиц 0,5 мм x 1,9 мм x 0,2 мм, показанных на рис. 5.

Для исследования композита был выбран следующий состав ПСФ+10%С для отработки методики. Перемешивание пластин ПСФ с графитом производилось вручную поочередно в нескольких емкостях.

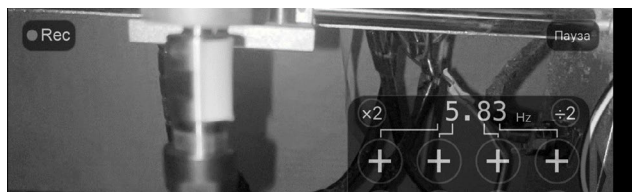


Рис. 4. Окно программы по определению частоты вращения вала.  
Fig. 4. Window of the shaft rotation frequency test program.

## ИСПЫТАНИЯ

Процесс трения осуществлялся при помощи стального вала  $\varnothing$  3 мм.

Мощность, потребляемая машиной трения на холостом ходу  $W=22.2$  Вт.

Данные испытаний представлены в табл. 1.

Примеры замера лунок износа образцов приведены на рис. 6, 7.

На основании таблицы испытаний, определены трибологические характеристики материала (табл. 2, 3).

Таблица 1. Данные с испытаний

Table 1. Test data

Нагрузка на тело трения, Н	Частота вращения вала, Гц	Время испытаний, мин	0,5	1,5	6,5	16,5
Капролон						
14,7	5,83	$L$ , мм	–	0,7	0,71	0,85
		$W$ , Ватт	23	22,8	23	23
29,4	5,8	$L$ , мм	0,84	0,85	0,9	–
		$W$ , Ватт	23,5	24,3	24,7	–
ПСФ 150+С						
14,7	5,83	$L$ , мм	1,4	2	2,4	–
		$W$ , Ватт	22,8	23,2	23,5	–
29,4	5,8	$L$ , мм	1,4	1,9	2,4	–
		$W$ , Ватт	23,8	24	23,8	–

Таблица 2. Трибологические характеристики капролона по результатам испытаний

Table 2. Tribological test parameters of caprolon

Нагрузка на стенд, Н	Параметры	Время испытаний, мин			
		0,5	1,5	6,5	16,5
14,7	$h_l$	–	0,01	0,01	0,02
	$S$ , путь трения, м	–	4,94	21,42	54,37
	$P$ , МПа	–	1,40	1,38	1,15
	$F_{тр}$	–	0,07	0,09	0,08
29,4	$h_l$	0,02	0,02	0,02	–
	$S$ , путь трения, м	1,64	4,92	21,31	–
	$P$ , МПа	2,33	2,31	2,18	–
	$F_{тр}$	0,25	0,40	0,45	–

Таблица 3. Трибологические характеристики ПСФ+10%С по результатам испытаний

Table 3. Tribological test parameters of PSF+10%С

Нагрузка на стенд, Н	Параметры	Время испытаний, мин			
		0,5	1,5	6,5	16,5
14,7	$h_l$	0,05	0,11	0,16	–
	$S$ , путь трения, м	4,61	6,59	7,91	–
	$P$ , МПа	2,10	1,47	1,23	–
	$F_{тр}$	0,10	0,12	0,13	–
29,4	$h_l$	0,05	0,10	0,16	–
	$S$ , путь трения, м	1,64	4,92	21,31	–
	$P$ , МПа	4,20	3,09	2,45	–
	$F_{тр}$	0,55	0,46	0,32	–



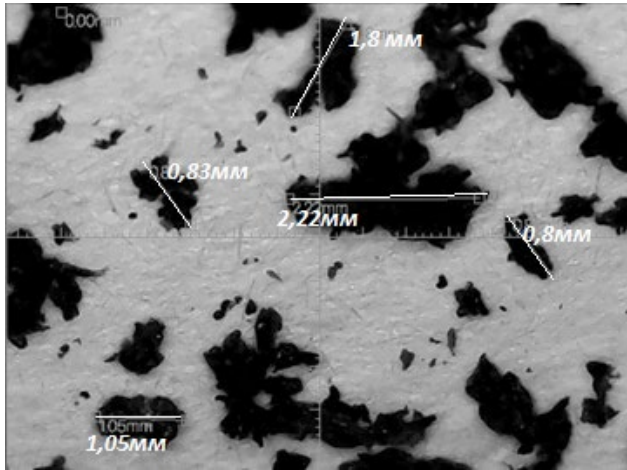


Рис. 5. Размеры частиц перемолотых гранул.  
Fig. 5. Particle sizes of ground granules.

**Следы износа образцов**

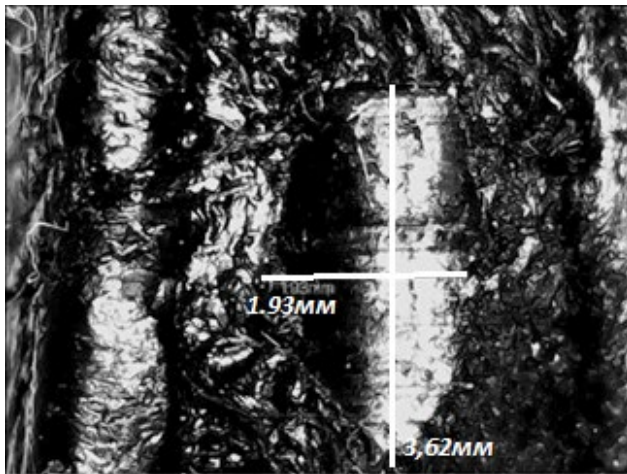


Рис. 6. Износ ПСФ+10%С. При условиях трения: нагрузка 1,5 кг, 1,5 мин. Трения.  
Fig. 6. Wear of PSF+10%С. Friction conditions: 1.5 kg load, 1.5 min friction.

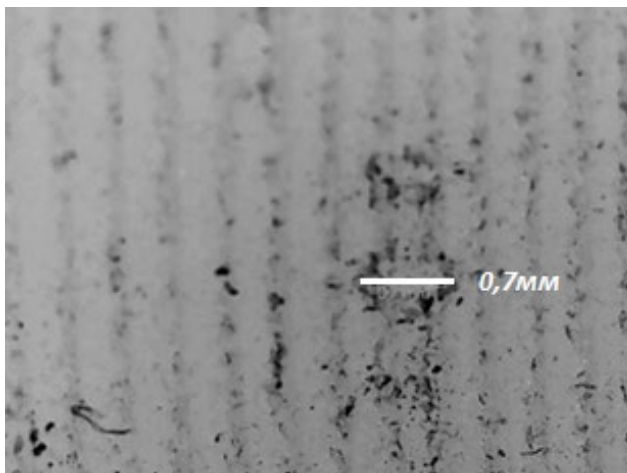


Рис. 7. Износ капролона. При условиях трения: нагрузка 1,5 кг, 6,5 мин. Трения результаты испытаний представлены в виде сравнительных графиков (Рис. 8–11).  
Fig. 7. Caprolon wear. Friction conditions: 1.5 kg load, 6.5 min friction. For test results, see comparative graphs (Fig. 8–11).

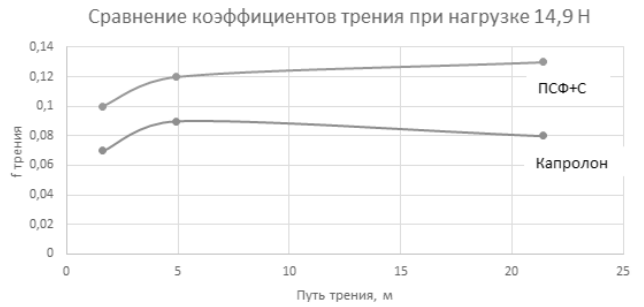


Рис. 8. Сравнение коэффициентов трения при нагрузке 14,9 Н.  
Fig. 8. Friction coefficients comparison for a load of 14.9 N.

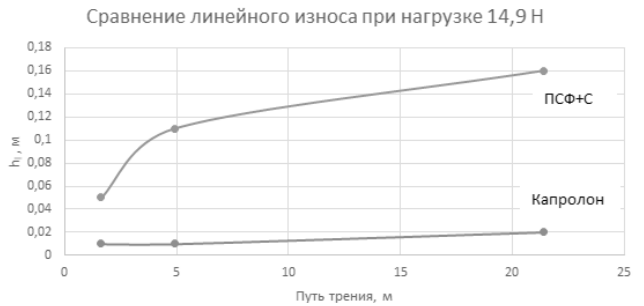


Рис. 9. Сравнение линейного износа при нагрузке 14,9 Н.  
Fig. 9. Linear wear comparison for a load of 14.9 N.

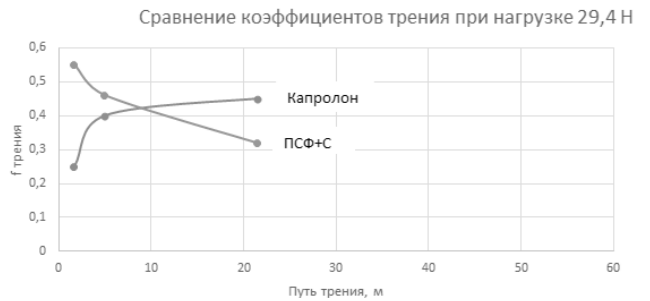


Рис. 10. Сравнение коэффициентов трения при нагрузке 29,4 Н.  
Fig. 10. Friction coefficients comparison for a load of 29.4 N.

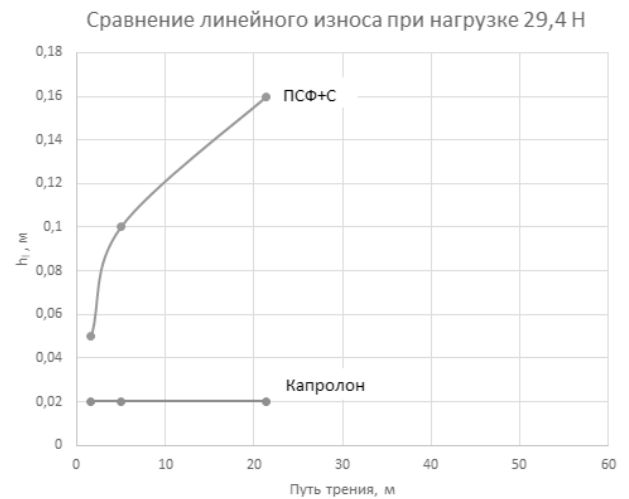


Рис. 11. Сравнение линейного износа при нагрузке 29,4 Н.  
Fig. 11. Linear wear comparison for a load of 29.4 N.

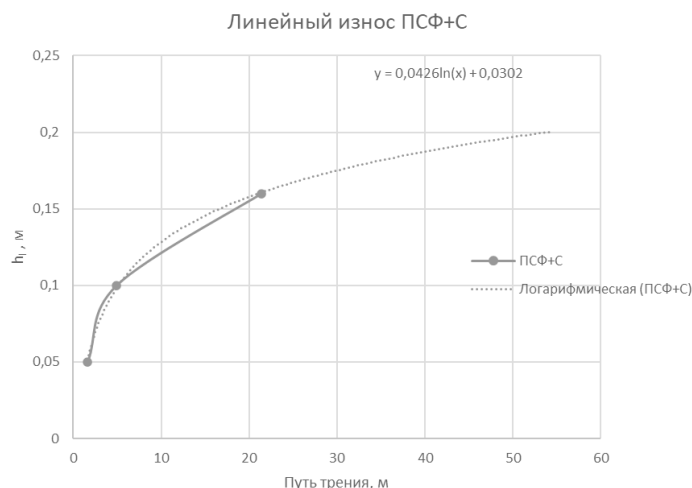


Рис. 12. Линейный износ ПСФ+10%С.

Fig. 12. Linear wear of PSF+10%С.

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИСПЫТАНИЙ

Исходя из результатов эксскремента можно сделать вывод, для капролона при нагрузке 14,9Н в начале процесса трения наблюдается увеличение динамического коэффициента трения, после притирки коэффициент трения незначительно уменьшается. Динамический коэффициент трения для образца ПСФ+10%С больше порядка двух раз чем у капролона. В отличии от капролона, у ПСФ+10%С коэффициент трения увеличивается на всем рассматриваемом участке. Линейный износ для ПСФ+С на порядок больше, чем у капролона.

При нагрузке 29,4 Н для ПСФ+10%С наблюдается значительное уменьшение динамического коэффициента трения в процессе износа, причем значение линейного износа аналогичные, как и при опыте с нагрузкой 14,9 Н. Вероятно материал обладает достаточной твердостью для сопротивления трению под разной нагрузкой, но является хрупким, в связи с чем процесс износа зависит в большей степени от пути трения нежели удельного давления.

Капролон в данном эксперименте сохраняет постоянным значение линейного износа (максимальное значение, достигнутое при нагрузке 14,9Н.

Относительная износостойкость материала ПСФ+10%С относительно капролона, определяемая по формуле 3,4, лежит в диапазоне 0,08-0,33.

Таким образом, полученный материал ПСФ+10%С уступает капролону по износу и коэффициенту трения, а также коэффициенту относительной износостойкости.

По результатам эксперимента построена математическая модель линейного износа ПСФ+10%С.

$$h_l = 0.0426 \ln(S) + 0.0302. \quad (8)$$

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработка современных антифрикционных материалов с высокими физико-механическими свойствами остается актуальной задачей, в том числе, отечественного судостроения.

В связи с этим в данной работе был рассмотрен композит на основе ПСФ 150 с добавлением графита как альтернативный антифрикционный материал.

Для определения механических свойств полученного материала было подготовлено оборудование и изготовлена специальная оснастка. Образец материала был подвергнут испытаниям на трение с различной нагрузкой и продолжительностью воздействия. Также был испытан капролоновый образец сравнения.

На основании полученных данных, можно сказать, что полученный материал ПСФ+10%С уступает капролону по износу и коэффициенту трения, а также коэффициенту относительной износостойкости. Исследуемый состав композита не может быть рекомендован для применения в дейдвудных подшипниках, однако полученная математическая модель износа может найти применения в других областях науки и техники.

## ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ИНФОРМАЦИЯ

**Вклад авторов.** Н.А. Поляков — поиск публикаций по теме статьи, проведение экспериментов, написание текста рукописи. С.Г. Чулкин — редактирование текста рукописи, экспертная оценка.

**Источники финансирования.** Авторы заявляют об отсутствии внешнего финансирования при проведении исследования.

**Конфликт интересов.** Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией настоящей статьи.

**Генеративный искусственный интеллект.** При создании настоящей статьи технологии генеративного искусственного интеллекта не использовались.

## ADDITIONAL INFO

**Author contributions:** N.A. Polyakov: investigation, writing—original draft; S.G. Chulkin: writing—review & editing.

**Funding sources:** The study was not supported by any external sources.

**Disclosure of interests:** The authors have no explicit or potential conflicts of interests associated with the publication of this article.

**Generative AI:** No generative artificial intelligence technologies were used to prepare this article.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Штейнберг Е.М., Зенитова Л.А. Полисульфон как функциональный полимерный материал и его производство // Международный научно-исследовательский журнал. 2012. № 6-1(6). С. 23–28. EDN: PMFHLLT
2. Чердынцев В.В., Бойков А.А. Трибологические свойства полимерных нанокмозитов на основе сверхвысокомолекулярного полиэтилена и полисульфона // Интернет-журнал Науковедение. 2013. № 4(17). С. 13. EDN: RSHDGGX
3. Шевчук А.П., Сенатов Ф.С., Чердынцев В.В. Исследование трибологических свойств композиционных покрытий на основе полисульфона // Современные проблемы науки и образования. 2012. № 5. С. 125. EDN: PKWTML
4. Краснов А.П., Наумкин А.В., Горошков М.В. Антифрикционность и антифрикционные свойства термостойких термопластов. В кн.: Трибология — машиностроению: Труды XII Международной научно-технической конференции, посвященной 80-летию ИМАШ РАН, Ижевск, 19–21 ноября 2018 г. Ижевск: Ижевский институт компьютерных исследований, 2018. С. 259–261. EDN: YQTXDVB
5. Дьячкова Т.П., Редкозубова Е.П., Леус З.Г. и др. Влияние модификации функционализированными углеродными нанотрубками на свойства полисульфона // Фундаментальные исследования. 2013. № 8-5. С. 1081–1086. EDN: QYSGYL
6. Мохаммад Х., Степашкин А.А. Механические и проводящие свойства графитонаполненных композитов на основе полисульфона. В кн.: XXVI Туполевские чтения (школа молодых ученых): Материалы Международной молодежной научной конференции. Сборник докладов, Казань, 09–10 ноября 2023 года. Казань: ИП Сагиев А.Р., 2023. С. 386–392. EDN: CZZZTX
7. Браславский А.С., Березний В.В. Обобщение опыта технической эксплуатации действующих устройств и тенденции их дальнейшего развития // Вестник МГТУ. Труды Мурманского государственного технического университета. 2004. Т. 7, № 3. С. 400–408. EDN: IYDDN
8. Поляков Н.А., Чулкин С.Г. Подбор композита для 3d печати трибосопряжений для глайдеров // Научный аспект. 2024. Т. 6, № 5. С. 719–727. EDN: ZWAMAQ
9. Ефремов Л.В., Тикалов А.В. Оценка износостойкости материалов на машине трения при снижении удельного давления на плоский образец // Известия высших учебных заведений. Приборостроение. 2020. Т. 63, № 1. С. 78–83. DOI: 10.17586/0021-3454-2020-63-1-78-83 EDN: JKBBII
10. Ефремов Л.В., Тикалов А.В. Современные способы испытаний материалов на износ // Известия высших учебных заведений. Приборостроение. 2022. Т. 65, № 12. С. 886–894. DOI: 10.17586/0021-3454-2022-65-12-886-894 EDN: JXZQWH

## REFERENCES

1. Shtejnberg EM, Zenitova LA. Polysulfone as a functional polymer material and its production. *Mezhdunarodnyj nauchno-issledovatel'skiy zhurnal*. 2012;6-1(6):23–28. (In Russ.) EDN: PMFHLLT
2. Cherdynceev VV, Bojkov AA. Tribological properties of polymer nanocomposites based on ultrahigh molecular weight polyethylene and polysulfone. *Internet-zhurnal Naukovedenie*. 2013;4(17):13. (In Russ.) EDN: RSHDGGX
3. Shevchukov AP, Senatov FS, Cherdynceev VV. Investigation of tribological properties of composite coatings based on polysulfone. *Sovremennyye problemy nauki i obrazovaniya*. 2012;5:125. (In Russ.) EDN: PKWTML
4. Krasnov AP, Naumkin AV, Goroshkov MV. Antifriction and antifriction properties of heat-resistant thermoplastics. In: *Tribology — Mechanical engineering: Proceedings of the XII International Scientific and Technical Conference dedicated to the 80th anniversary of IMASH RAS, Izhevsk, November 19–21, 2018*. Izhevsk: Izhevsk Institute of Computer Research; 2018:259–261. (In Russ.) EDN: YQTXDVB
5. Dyachkova TP, Redkozubova EP, Leus ZG, et al. The effect of modification by functionalized carbon nanotubes on the properties of polysulfone. *Fundamentalnye issledovaniya*. 2013;8-5:1081–1086. (In Russ.) EDN: QYSGYL
6. Moxammad X, Stepashkin AA. Mechanical and conductive properties of graphite-filled composites based on polysulfone. In: *XXVI Tupolev readings (school of young scientists) : Proceedings of the International Youth Scientific Conference. Collection of reports, Kazan] 09–10 11 2023*. Kazan: IP Sagiev AR; 2023:386–392. (In Russ.) EDN: CZZZTX
7. Braslavskij AS, Berezniy VV. Generalization of the experience of technical operation of stern tube devices and trends in their further development. *Vestnik MGTU. Trudy Murmanskogo gosudarstvennogo texnicheskogo universiteta*. 2004;7(3):400–408. (In Russ.) EDN: IYDDN
8. Polyakov NA, Chulkin SG. Selection of a composite for 3d printing of tribo-conjugations for gliders. *Nauchnyj aspekt*. 2024;6(5):719–727. (In Russ.) EDN: ZWAMAQ
9. Efremov LV, Tikalov AV. Evaluation of the wear resistance of materials on a friction machine with a decrease in the specific pressure on a flat sample. *Izvestiya vysshix uchebnyx zavedenij. Priborostroenie*. 2020;63(1):78–83. (In Russ.) DOI: 10.17586/0021-3454-2020-63-1-78-83 EDN: JKBBII
10. Efremov LV, Tikalov AV. Modern methods of testing materials for wear. *Izvestiya vysshix uchebnyx zavedenij. Priborostroenie*. 2022;65(12):886–894. (In Russ.) DOI: 10.17586/0021-3454-2022-65-12-886-894 EDN: JXZQWH

## ОБ АВТОРАХ

\***Никита Александрович Поляков**, аспирант, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет; адрес: 190121, Санкт-Петербург, ул. Лотманская, 3; eLibrary SPIN: 9150-5890; e-mail: nik.polyackov2010@yandex.ru

**Сергей Георгиевич Чулкин**, д-р техн. наук, профессор, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет; eLibrary SPIN: 9201-5361; e-mail: chulkin@smtu.ru

## AUTHORS' INFO

\***Nikita A. Polyakov**, postgraduate student, Saint Petersburg State Marine Technical University; address: 3 Lotsmanskaya st, Saint Petersburg, 190121, Russia; eLibrary SPIN: 9150-5890; e-mail: nik.polyackov2010@yandex.ru

**Sergey G. Chulkin**, Dr. Sci. (Engineering), Professor, Saint Petersburg State Marine Technical University; eLibrary SPIN: 9201-5361; e-mail: chulkin@smtu.ru

\* Автор, ответственный за переписку / Corresponding author

Оригинальное исследование

УДК 539.422.224:004.942

DOI: [https://doi.org/10.52899/24141437\\_2025\\_02\\_215](https://doi.org/10.52899/24141437_2025_02_215)

EDN: QKTZDF

# Возможности численных бессеточных методов для моделирования механического поведения ледовой среды

А.А. Родионов, С.В. Рябушкин

Санкт-Петербургский государственный морской технический университет, Санкт-Петербург, Россия

## АННОТАЦИЯ

**Актуальность.** Современные инструменты численного моделирования представляют широкие возможности для решения актуальных прикладных задач ледовой механики. Однако лед является сложным для моделирования материалом, что требует выработки соответствующих подходов для математического описания его поведения.

**Цель работы** — обзор и исследование возможностей современных численных методов для моделирования льда, а также разработка собственной математической модели для решения задач взаимодействия со льдом.

**Материалы и методы.** Анализ применения численных методов в ледовой механике выполняется на основе обзора соответствующих публикаций в научно-технических журналах. Основным методом исследования является вычислительный эксперимент с применением различных подходов к описанию поведения материала под нагрузкой.

**Результаты.** Получена математическая модель льда на базе метода сглаженных частиц. Выполнено моделирование стандартных механических испытаний ледовых образцов для тестирования метода и калибровки модели материала.

**Заключение.** Результаты расчетов согласуются с экспериментальными данными. Разработанная модель в перспективе может быть использована для решения задач взаимодействия инженерных конструкций со льдом.

**Ключевые слова:** численное моделирование; ледовая среда; механика льда; бессеточные методы; метод сглаженных частиц; модель Джонсона-Холмквиста.

## Как цитировать

Родионов А.А., Рябушкин С.В. Возможности численных бессеточных методов для моделирования механического поведения ледовой среды // Труды Санкт-Петербургского государственного морского технического университета. 2025. Т. 4, № 2. С. 215–228. DOI: 10.52899/24141437\_2025\_02\_215 EDN: QKTZDF

Original study article

DOI: [https://doi.org/10.52899/24141437\\_2025\\_02\\_215](https://doi.org/10.52899/24141437_2025_02_215)

EDN: QKTZDF

# Potential of Meshless Numerical Methods for Mechanical Simulation of Ice Environment

Aleksandr A. Rodionov, Sergey V. Ryabushkin

Saint Petersburg State Marine Technical University, Saint Petersburg, Russia

## ABSTRACT

**BACKGROUND:** Modern numerical modeling tools provide ample opportunities for solving current applied problems of ice mechanics. However, ice is difficult to model and it requires the development of appropriate approaches to the mathematical description of its behavior.

**AIM:** To review and study the capabilities of contemporary numerical ice modeling methods and develop our own mathematical model to solve ice interaction problems.

**MATERIALS AND METHODS:** The application of numerical methods in ice mechanics is analyzed based on a review of relevant publications in scientific and technical journals. The main study method is a computational experiment using various approaches to describing the on-load behavior of the material.

**RESULTS:** We defined a mathematical ice model using the smoothed particle hydrodynamics method. We simulated standard mechanical tests of ice samples to test the method and adjust the material model.

**CONCLUSIONS:** The calculations are consistent with the experimental data. In the future, the developed model can be used to solve problems of engineering structures and ice interaction.

**Keywords:** numerical modeling; ice medium; ice mechanics; meshless methods; smoothed particle hydrodynamics method; Johnson–Holmquist damage model.

## To cite this article

Rodionov AA, Ryabushkin SV. Potential of Meshless Numerical Methods for Mechanical Simulation of Ice Environment. *Transactions of the Saint Petersburg State Marine Technical University*. 2025;4(2):215–228. DOI: 10.52899/24141437\_2025\_02\_215 EDN: QKTZDF

Submitted: 19.02.2025

Accepted: 05.05.2025

Published online: 26.06.2025

## ВВЕДЕНИЕ. ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМЫ

В последнее время численные методы в прикладной механике льда переживают интенсивное развитие, обусловленное растущей потребностью в разработке и усовершенствовании расчетных моделей контактного взаимодействия элементов конструкции с ледовой средой. Ледовые условия, характерные для арктических и субарктических регионов, создают серьезные вызовы при проектировании и эксплуатации инженерных сооружений, таких как буровые платформы, ледакольные суда, амфибийные транспортные средства, элементы пропульсивного комплекса (ПК) и т.д. Корректное и достоверное определение ледовых нагрузок имеет большое прикладное значение для обеспечения надежности, безопасности и долговечности перечисленных конструкций и сооружений.

Традиционно для оценки ледовых нагрузок разрабатываются специализированные нормативные документы, которые относятся к определенному типу сооружений и в значительной степени опираются на экспериментальные исследования и накопленный опыт эксплуатации. Такой подход обычно приводит к консервативным оценкам с упрощенными схемами приложения нагрузок, что не позволяет в полной мере учитывать сложную многофакторную природу и динамику взаимодействия объекта со льдом. Эти обстоятельства подчеркивают необходимость применения современных методов проектирования морских ледостойких сооружений, включая численное моделирование силового взаимодействия льда с элементами и деталями конструкций, сооружений и машин. Развитие численных методов позволяет моделировать сложные процессы взаимодействия льда с инженерными объектами, что открывает новые возможности для повышения эффективности проектных решений, особенно в условиях ограниченного опыта эксплуатации.

В настоящее время полномасштабное численное моделирование в проектировании морских ледостойких сооружений используется крайне редко. Хотя количество исследований по численному моделированию механики льда пока невелико, их число увеличивается в последние годы, что свидетельствует о растущем интересе научного сообщества к этой теме. Необходимо отметить, что, с вычислительной точки зрения, задачи локального взаимодействия жестких объектов и деформируемых конструкций с ледовыми массивами являются одними из самых сложных задач механики деформируемого твердого тела (МДТТ), так как они включают практически все виды нелинейностей. В общем случае, указанные задачи являются нестационарными (быстропротекающими), контактными, геометрически и физически нелинейными, что требует выработки соответствующих подходов к численному моделированию контактного взаимодействия с ледовой средой.

На сегодняшний день не существует общепризнанных численных моделей, которые бы учитывали все

особенности поведения льда под нагрузкой. Это отчасти объясняет большое количество численных моделей, разработанных за последние годы для описания поведения хрупких материалов, таких как лед. Более того, остаются нерешенными вопросы о возможности использования и пределах применимости различных численных методов, разработанных в других областях МДТТ, непосредственно для моделирования контактного взаимодействия льда с конструкциями и элементами сооружений. Отсутствие общепризнанного мнения по данному вопросу служит стимулом для более детальной и глубокой проработки проблемы.

На основании изложенного, целью настоящей работы является обзор и анализ возможностей современных численных методов МДТТ применительно к задачам скоростного деформирования и разрушения ледовой среды, а также разработка собственной математической модели, интегрирующей новейшие достижения вычислительной механики, для описания механического поведения льда в широком диапазоне изменения внешних воздействий.

## ФУНДАМЕНТАЛЬНЫЕ ПОДХОДЫ К МАТЕМАТИЧЕСКОМУ МОДЕЛИРОВАНИЮ ЛЕДОВОЙ СРЕДЫ

На текущий момент различают два основных фундаментальных подхода к рассмотрению (моделированию) льда [1]:

1. Как *сплошного* тела в виде непрерывной среды, поведение которой описывается классическими уравнениями механики сплошных сред (МСС). Одним из ключевых преимуществ рассматриваемого подхода является возможность его легкой интеграции с классическими сеточными методами (методом конечных элементов, МКЭ и его модификациями). Однако, несмотря на широкую распространенность МКЭ, моделирование льда как сплошного тела имеет серьезные ограничения в задачах хрупкого разрушения, сопровождающегося нарушениями сплошности и интенсивной дефрагментацией ледовой среды;
2. Как *дискретного* тела, состоящего из большого числа отдельных элементов (частиц, гранул), способных определенным образом взаимодействовать друг с другом. Для описания механического поведения среды в рамках указанного подхода используются бессеточные методы МДТТ, не зависящие от фиксированной сетки, характерной для традиционных методов (МКЭ и его модификации). Фактическое отсутствие конечно-элементной сетки и замена тела набором отдельных частиц позволяет эффективнее и точнее моделировать процессы динамического взаимодействия и разрушения, сопровождающиеся интенсивным трещинообразованием и дефрагментацией материала (в виде дробления, крошения, скалывания и смятия).

В связи с тем, что на текущий момент не существует общепризнанных методов численного моделирования силового воздействия льда на конструкции и сооружения, предварительный анализ и сопоставление различных подходов, выработанных в отдельных областях прикладной механики льда, остается актуальным.

## ВОЗМОЖНОСТИ СЕТОЧНЫХ МЕТОДОВ В ЗАДАЧАХ ПРИКЛАДНОЙ МЕХАНИКИ ЛЬДА

Исторически для численного моделирования ледовой среды исследователи сначала начали применять сеточные методы, ставшие основной для анализа механического поведения льда под нагрузкой, особенно в области пластического поведения при относительно невысоких скоростях деформации.

**Метод конечных элементов** (МКЭ, или Finite Element Method, FEM) широко распространен для решения задач МДТТ и является наиболее очевидным методом для моделирования взаимодействия льда с телами. Имеющийся на текущий момент опыт моделирования разрушения льда [1] предлагает несколько наиболее часто используемых решений: 1) использование технологии удаления отдельных разрушенных элементов (Element Erosion Technique, EET),

обладающей целым рядом упрощений и допущений. В EET ледовое поле моделируется как сплошное тело, для которого задаются законы деформирования и критерии разрушения. Разрушенные элементы удаляются из модели и не участвуют в последующем процессе взаимодействия, что, очевидно, приводит к нарушению законов сохранения и не может восприниматься как надежный метод для расчета параметров ледового воздействия на конструкцию. Графический пример расчетов с применением технологии удаления разрушенных элементов (EET) представлен на рис. 1 [1, 2].

2) использование расширенного метода конечных элементов (XFEM), позволяющего моделировать развитие трещин (повреждений) в теле в произвольном направлении вне зависимости от КЭ-сетки. На текущий момент имеется успешный опыт моделирования разрушения при помощи XFEM для таких материалов, как бетон и сталь [3], однако непосредственно для льда метод, вероятно, не применялся. К серьезным недостаткам метода XFEM относится слабая сходимость решения при наличии большого количества повреждений (трещин), что не может в полной мере быть использовано при моделировании хрупкого разрушения льда, для которого характерна интенсивное нарушение сплошности [3].

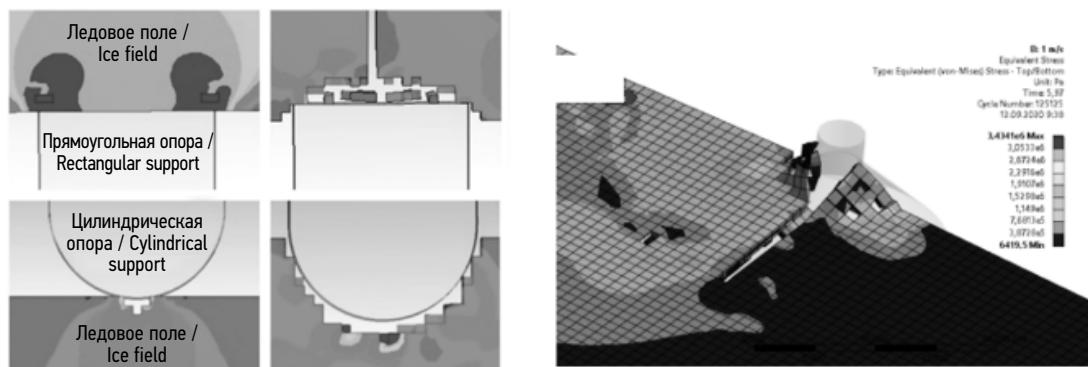


Рис. 1. Моделирование внедрения опоры сооружения в ледовое поле с применением технологии удаления разрушенных элементов (EET), по материалам [1, 2].

Fig. 1. Model of the structure support incorporation into an ice floe using the Exploded Element Removal (EET) technology based on materials from [1, 2].

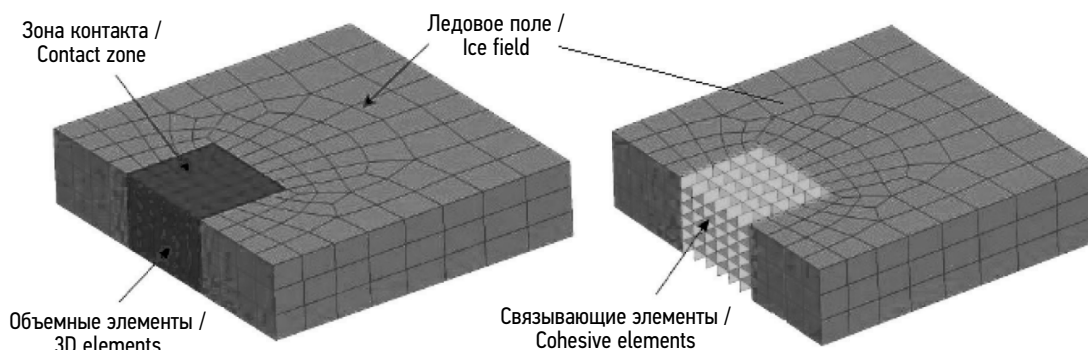


Рис. 2. Фрагмент КЭ-модели ледового поля с использованием метода сцепляющихся элементов [6, 7].

Fig. 2. Fragment of the finite element model of an ice floe built using the finite element method (FEM) [6, 7].

**Метод сцепляющихся (когезионных) элементов** (МСЭ, Cohesive Zone Elements, CZM), нашедший применение в области механики хрупкого разрушения для моделирования процессов возникновения и распространения трещин в деформируемых твердых телах [4, 5].

В задачах ледовой механики в МСЭ-подходе сплошное ледовое поле строится в КЭ-постановке и состоит из основных (bulk) и вспомогательных (связывающих, cohesive) элементов (см. рис. 2) [6, 7]. В качестве основных элементов принимается сплошное ледовое поле, разбитое на  $n$  конечных элементов. Связывающие элементы в модели ледового поля выполняют роль трещин. При достижении критических напряжений трещины раскрываются путем удаления соответствующих когезионных элементов. В отличие от рассмотренных выше методов, в CZM-постановке разрушенные элементы не удаляются из модели, а, наоборот, присутствуют в ней в виде ледовых обломков, взаимодействующих с сооружением и между собой. Таким образом, одним из важнейших аспектов CZM-модели является учет процесса перехода сплошного ледового образования при его разрушении к дискретному (образование фрагментов льда).

К настоящему времени метод CZM нашел достаточно широкое применение в задачах численного моделирования взаимодействия льда с различными сооружениями и конструкциями (рис. 3). В работе [6] выполнено численное моделирование взаимодействия лопасти гребного винта со льдом на режиме фрезерования (прорезания) льда. В серии работ авторов [7] и др. проведено численное моделирование разрушения ледового поля при движении судна во льдах. В работе [8] моделировалось взаимодействие ледового поля с маяком Norströmsgrund. Работа [9] посвящена результатам моделирования ледовых воздействий на вертикальную колонну с применением методологии сцепляющихся элементов (CZM) (см. рис. 3).

Следует отметить, что в ходе моделирования указанных выше задач в режиме реального времени получены «физические» картины разрушения ледового поля в процессе его взаимодействия с конструкций, а также, в целом, удовлетворительные зависимости глобальных ледовых нагрузок от времени. Указанные обстоятельства

говорят в пользу технологии (метода) сцепляющихся элементов (CZM) как об инструменте, способном с высокой степенью достоверности моделировать ледовые воздействия. К недостаткам метода можно отнести сеточную зависимость, а также возможность распространения трещин только в плоскостях когезионных элементов.

## ВОЗМОЖНОСТИ БЕССЕТОЧНЫХ МЕТОДОВ В ЗАДАЧАХ ПРИКЛАДНОЙ МЕХАНИКИ ЛЬДА

В отличие от традиционных сеточных методов (МКЭ), бессеточные методы в настоящее время находятся лишь на начальном этапе полномасштабного внедрения в программные комплексы численного моделирования и по этой причине пока не достигли присущей МКЭ степени проработки. Несмотря на их значительный потенциал в моделировании разрушения и скоростного контактного взаимодействия, многие аспекты бессеточных методов (такие как численная стабильность, возможность использования специализированных решателей и технологий моделирования) требуют дальнейшего исследования и улучшения. В настоящее время бессеточные методы, безусловно, являются перспективным вектором развития, однако пока что не обладают столь же обширной верификационной базой, как сеточные методы, что ограничивает их широкое использование в инженерной практике [10].

**Гидродинамика сглаженных частиц** (Smooth Particle Hydrodynamics, SPH) представляет собой бессеточный метод, в котором среда заменяется набором частиц, между которыми распределены параметры среды. Указанные частицы среды имеют пространственное расстояние (т.н. длину сглаживания), на котором их свойства сглаживаются функцией ядра. Это означает, что любая физическая величина любой частицы может быть получена суммированием соответствующих величин всех частиц, находящихся в пределах действия их сглаженных длин.

Как следует из названия, SPH широко применяется в вычислительной гидродинамике, однако в настоящее

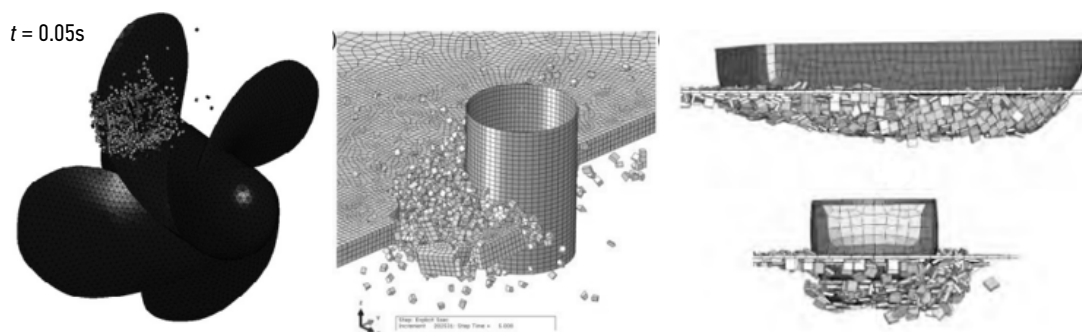


Рис. 3. Примеры использования МСЭ для численного моделирования взаимодействия льда с лопастями ГВ [6], опоры сооружения [8, 9], корпуса судна [7].

Fig. 3. Cases of FEM utilization for numerical modeling of ice interaction with the blades of a main propeller [6], structure support [8, 9], and the vessel hull [7].



время активно ведутся работы по адаптации метода для МДТТ, в первую очередь применительно к задачам хрупкого разрушения [11, 12]. Метод позволяет моделировать развитые деформации и разрушения среды путем разделения скопления частиц. В [13] представлены решения задач хрупкого разрушения образцов льда при изгибе и сжатии, а также выполнено прогрессирующее разрушение ледяной балки о препятствие и разрушение равномерного ледяного покрова при прохождении судна с разными скоростями (без учета водной среды). В работе [14] выполнено численное моделирование взаимодействия цилиндрической колонны (гладкой, с цилиндрическими и кольцевой наделками) с ровным ледовым полем в SPH-постановке (см. рис 4).

Основные достоинства SPH [10] заключаются в фактическом отсутствии КЭ-сетки и, как следствие, сеточной независимости результатов расчетов. В SPH пути разрушения льда возникают естественным образом, а наличие начального дефекта (трещины), как в сеточных методах, не требуется. При этом, хотя качественная картина разрушения не зависит от конфигурации частиц, минимальные размеры осколков льда зависят от их размеров, т.е. от степени дискретизации расчетной области. Отмечается [10, 14], что главным недостатком SPH-метода является нестабильность растяжения, при которой разрушение происходит не по физическим критериям, а из-за «потери видимости» друг друга соседними частицами вследствие больших деформаций среды. Также в SPH имеется проблема строгого удовлетворения граничных условий (ГУ) [10, 14]. Помимо этого, SPH подвержен наличию «паразитных» собственных колебаний с нулевой энергией, что является следствием аппроксимации как значений поля, так и его производных в одних и тех же точках [10, 14]. Таким образом, приложения метода SPH к механике твердых тел до сих пор остается относительно неисследованной областью знаний.

В целом, метод SPH больше направлен на моделирование водной среды. В ряде работ [15–17] лед в SPH-постановке рассматривается как упругий объект, движущийся по поверхности воды. Можно сделать вывод, что метод гидродинамики сглаженных частиц (SPH)

лучше всего подходит для крупномасштабного исследования, анализа переноса больших масс льда, оценки давления жидкости на ледяной покров и т.д., т.е. в задачах, в которых не требуется непосредственное рассмотрение локальной деформации и разрушения льда.

**Метод сглаженных частиц Галеркина (Smoothed Particle Galerkin, SPG)**, также известный как метод частиц с физическим механизмом разрушения, хорошо зарекомендовал себя при описании больших деформаций, разрушения и дефрагментации материалов [10]. В методе SPG была предпринята попытка преодолеть ограничения, наложенные на применение метода SPH для моделирования разрушения твердых тел. При моделировании разрушения материала в отличие от традиционных сеточных методов (МКЭ и его модификаций) в расчетной модели выполняются все законы сохранения (масса, импульс, энергия), что является необходимым для корректного описания процессов деформирования и разрушения среды. Критерий разрушения (т.е. нарушения связи между частицами среды) может быть определен непосредственно в рамках конститутивной модели материала (в виде функции напряжений, деформаций, уровня накопленных повреждений и др.). Математический и численный анализ показал, что метод SPG является устойчивым и сходящимся при моделировании быстротекущего интенсивного разрушения материалов [18–20].

На сегодняшний день метод SPG успешно применяется для анализа пробития и высокоскоростного ударного воздействия на бетонные и металлические мишени, моделирования механической обработки металлов (шлифование, резание, сверление трением), прогрессирующего разрушения металлических и бетонных конструкций и т.д., т.е. в задачах, где требуется непосредственное физическое моделирование интенсивного разрушения и дефрагментации материала [18–20], что делает весьма перспективным использование указанного метода в прикладных задачах механики льда. Количество работ по использованию метода SPG для моделирования разрушения льда и расчета ледовых воздействий на сооружения на текущий момент весьма незначительно.

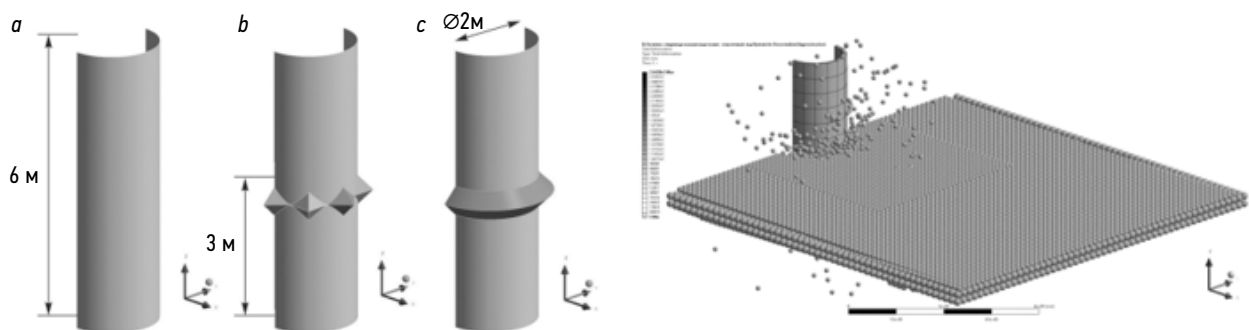


Рис. 4. Численное моделирование взаимодействия опорной колонны с ровным ледовым полем методом SPH, по материалам работы [14].

Fig. 4. Numerical model of pillar support interaction with a flat ice floe using the SPH method based on materials from [14].

В работе [21] выполнено численное моделирование взаимодействия ледового поля и опорной колонны, полученных с помощью методов SPH и SPG, однако сопоставление результатов расчета показало значительные расхождения в значениях. В то же время, в работе [22] на основе метода SPG выполнено моделирование разрушения ледового образца при одноосном сжатии, а также столкновение корпуса полярного судна с ледовым полем, см. рис. 5 ниже. В представленной работе [22] отмечается «согласованность результатов численного моделирования с экспериментом», что, в целом, говорит о возможности применения указанного метода для моделирования силового взаимодействия льда с деталями и конструкциями ледостойких сооружений, однако на текущий момент в первую очередь требуются дополнительные исследования по адаптации метода SPG применительно к задачам хрупкого разрушения.

**Метод дискретных элементов** (Discrete Element Method, DEM), помимо SPH и SPG, является другим бессеточным методом, применяемым для анализа хрупкого разрушения. В DEM-подходе физическое состояние системы складывается из физического состояния входящих в нее дискретных элементов [23]. Совокупность всех элементов образует исследуемую среду, но каждый дискретный элемент является независимым и определенный образом взаимодействует с соседними элементами. Общее (макроскопическое) состояние/поведение системы является результатом взаимодействия отдельных (дискретных)

частиц. Изначально DEM был разработан для численного решения задач молекулярной динамики, но впоследствии был адаптирован для исследования динамики горных пород [23]. Теоретические основы метода DEM представлены в работе [24]. В настоящее время метод DEM активно применяется для моделирования сыпучих (гранулированных) сред [25]. Метод дискретных элементов наследует все преимущества бессеточных методов, а именно: DEM хорошо адаптирован для описания быстротекущих процессов, связанных с переносом вещества [23]. Указанные процессы оказалось легче описать в виде, когда каждая частица имеет отдельное физическое состояние, а эволюция всей среды (системы) обусловлена локальными физическими взаимодействиями между ее отдельными элементами.

Применение DEM для моделирования непрерывных (сплошных) сред потребовало выработки специальных подходов, нетипичных для исходного метода. Как результат, метод дискретных элементов был дополнен моделями связей в виде балок, соединяющих элементы [23, 26] (рис. 6, а). Связь между частицами представляет собой виртуальную балку, ограничивающую тангенциальное и нормальное смещение частиц относительно друг друга. Разрыв связи между частицами происходит при достижении заданных критических условий, после разрыва связи частицы сохраняются в расчетной модели и продолжают взаимодействовать как независимые твердые тела [23, 24, 26].

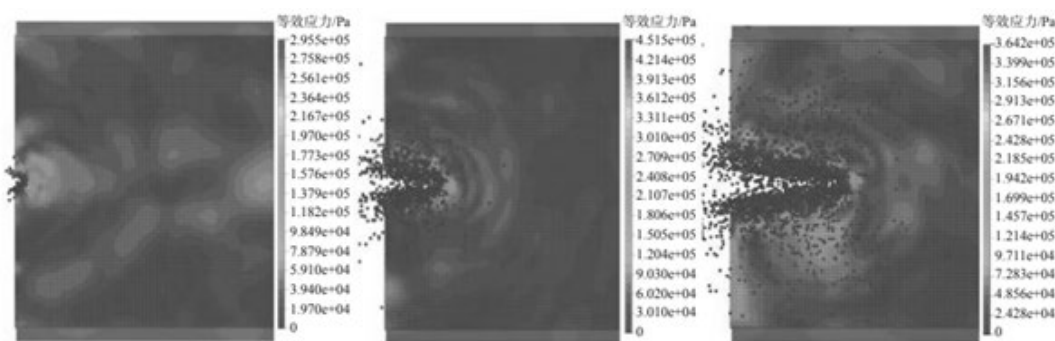


Рис. 5. Численное моделирование столкновения корпуса полярного судна с ледовым полем методом SPG (вид сверху). Распределение эквивалентных напряжений в ледовом блоке в различные моменты времени [22].

Fig. 5. Numerical model of the polar ship hull collision with an ice floe using the SPG method (top view). Equivalent stress distribution in an ice block at different time [22].

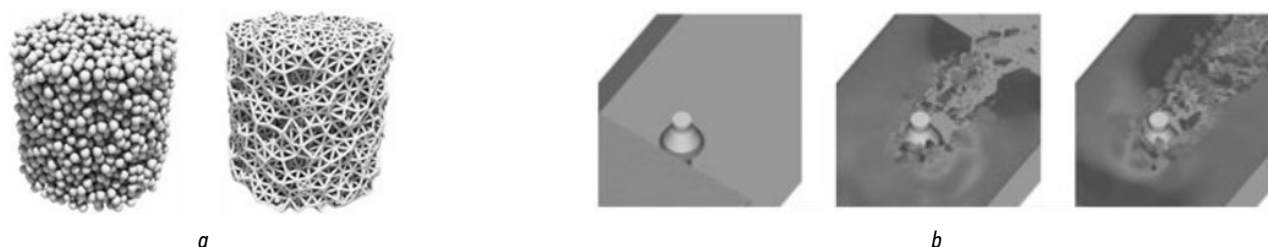


Рис. 6. Численное моделирование методов дискретных элементов: а — дискретные элементы и визуализация балочных связей между ними [23]; б — моделирование массивных льдин, воздействующих на опоры шельфовых установок [28].

Fig. 6. Numerical modeling using discrete element methods: a, discrete elements and visualization of tie beams between them [23]; b, modeling of massive ice floes impacting the supports of offshore installations [28].

На основе модифицированной модели DEM в настоящее время предпринимаются попытки построения численных моделей льда. Работа [27] является одной из первых работ по оценке применимости DEM для моделирования льда, в которой выполнено моделирование одноосного сжатия и изгиба простейших образцов морского льда в трехмерной постановке. Впоследствии откалиброванные мезопараметры материала распространены на модели массивных льдин, воздействующих на опоры шельфовых установок (рис. 6, б) [28]. Метод DEM подходит для моделирования льдин с учетом того, что он особенно эффективен при независимом движении большого числа элементов. Причем геометрическая форма дискретных элементов необязательно должна представлять собой сферу, как на рис. 6, что является простейшим случаем. Имеется возможность формирования двумерных/трехмерных осколков льда случайных размеров в заданных пределах [23, 24].

В работах [28–30] выполнено численное моделирование ледового сопротивления судна с использованием DEM-подхода, см. рисунок 7, и в режиме реального времени получены зависимости ледовых сил от скорости. Отмечается, что моделирование ледового сопротивления судна с применением DEM-методологии эффективно при исследовании зависимости пропульсивных характеристик от скорости движения (скорости взаимодействия со льдом) и толщины льда [30]. В целом ряде работ [31–34] в рамках методологии DEM представлено моделирование ледового покрова, его растрескивание и раскалывание, силовое воздействие на судно или опоры.

Как видно из данных приведенных работ, использование методологии DEM особенно эффективно и перспективно в моделировании механики льда, но на текущий момент разработка данного направления только начинается. Отмечается [23], что является возможным использование нескольких методов в единой модели: МДЭ — для моделирования хрупкого разрушения льда и МКЭ — для анализа НДС конструкций, на которые воздействует лед. Указанное обстоятельство позволяет одновременно решать проблемы внешних сил и внутренних усилий в рамках единой вычислительной модели.

К основным недостаткам метода можно отнести чувствительность механизма разрушения льда к таким

параметрам частиц, как их диаметр (в особенности отношение характерного размера ледового образца к размеру частиц), а также сложности определения нормальной и сдвиговой жесткости, прочности сцепления частиц на растяжение и сдвиг.

## МАТЕМАТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ МЕТОДА СГЛАЖЕННЫХ ЧАСТИЦ (SPG)

По результатам представленного выше обзора и анализа существующих численных методов МДТТ, одним из наиболее перспективных непосредственно в задачах деформирования и разрушения ледовой среды является метод сглаженных частиц (SPG) [18–20]. Разработанный в 2015 г., он является естественным развитием численных методов механики деформируемого твердого тела. Основные положения метода SPG, а также возможности его приложения в задачах прикладной механики льда содержатся в работах авторов [35, 36].

Задача механики сплошной среды для тела объемом  $\Omega$  и ограниченного поверхностью  $\Gamma$  в перемещениях  $u(x)$  (рис. 8) записывается в виде:

- уравнений равновесия в объеме:

$$F(u) + b = \rho \ddot{u} + c \dot{u} \text{ в объеме } \Omega ; \quad (1)$$

- кинематических граничных условий (ГУ) на части поверхности  $\Gamma_u$ :

$$u - \bar{u} = 0 \text{ на } \Gamma_u ; \quad (2)$$

- силовых граничных условий (ГУ) на части поверхности  $\Gamma_f$ :

$$\sigma \cdot n_v - \bar{f} = 0 \text{ на } \Gamma_f ; \quad (3)$$

- начальных условий (НУ):

$$u|_{t_0} = u_0 \text{ в области } \Omega ; \quad (4)$$

$$\dot{u}|_{t_0} = v_0 \text{ в области } \Omega , \quad (5)$$

где  $F(u)$  — вектор внутренних реакций деформируемой среды;  $b$  — вектор внешних сил;  $u'$ ,  $u''$  — векторы скоростей и ускорений соответственно;  $\rho$  — плотность

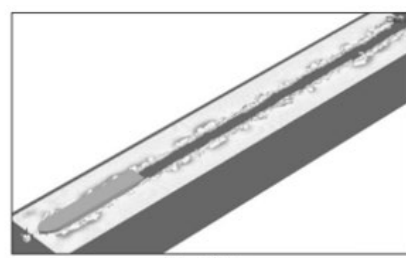
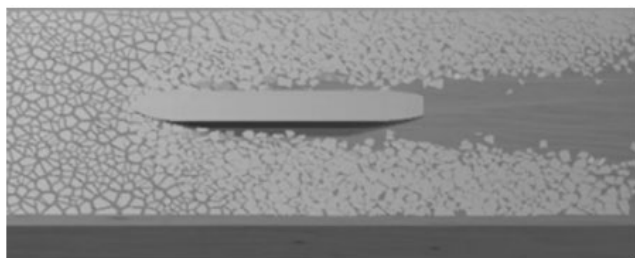


Рис. 7. Численное моделирование методом дискретных элементов ледового сопротивления судна в битом льду и прокладка канала ледоколом в сплошном льду [28–30].

Fig. 7. Numerical modeling of ship ice resistance in small floes using the discrete element method and icebreaker channeling in solid ice [28–30].

объема материала;  $c$  — коэффициент демпфирования;  $\tilde{u}$  — заданные перемещения;  $\tilde{f}$  — заданная интенсивность поверхностных сил;  $n_\nu$  — направляющие косинусы;  $\sigma$  — вектор напряжений;  $u_0$  — заданные начальные перемещения;  $v_0$  — заданная начальная скорость.

Приближенное решение задачи численными вариационно-разностными процедурами связано с аппроксимацией поля искомой функции  $u(x)$  с помощью набора функций формы, зависящих от конечного числа основных неизвестных параметров. Эта аппроксимация используется для приведения путем дискретизации дифференциального уравнения (1), граничных условий (2), (3) и начальных условий (4), (5) к набору систем алгебраических уравнений относительно основных неизвестных задачи.

Опорным объектом дискретизации бессеточного метода является узел. Взаимодействие между узлами, определяемое функциями формы, зависит только от взаимного положения узлов. Узлы наносятся внутри области  $\Omega$  и на границе  $\Gamma$ , в том числе на частях границы  $\Gamma_u$  и  $\Gamma_f$  (рис. 8). Векторы  $x$  и  $\xi$  содержат координаты произвольных точек тела, вектор  $x_i$  указывает на узел.

Основными характерными компонентами бессеточного метода являются: построение аппроксимации решения с помощью функций формы; построение дискретной формы уравнения равновесия; построение дискретной формы граничных и начальных условий [35, 36].

### Построение аппроксимации решения с помощью функций формы

Общее поле перемещений  $u(x)$  аппроксимируется конечным набором узловых параметров  $d_i$  с помощью некоторого набора координатных функций, определенных на всей области или на подобласти  $\Omega$  (в зависимости от варианта численной процедуры):

$$u(x) = \sum_{i=1}^N \phi_i(x) \cdot d_i, \tag{6}$$

где  $N$  — общее количество узловых параметров;  $\phi_i(x)$  — координатная функция или функция формы;  $d_i$  — узловые параметры в точке  $x_i$ .

В бессеточном методе для построения гладкого аппроксимирующего поля перемещений через узловые параметры  $d_i = d_i(x)$  применяется интегральное преобразование — свертка с использованием функции ядра  $\omega$  (оконная или весовая функция):

$$u(x) = \int_{\Omega} \omega(x - \xi, \gamma) \cdot d(\xi) d\Omega. \tag{7}$$

Уравнение (7) устанавливает, что перемещение в некоторой фиксированной точке  $x$  принимается как функция параметров перемещений окружающих точек  $\xi$ .

### Построение дискретной формы уравнения равновесия

Построение разрешающей системы уравнений выполняется с помощью минимизации невязки  $R_s(u(x))$ , полученной из уравнения (1) при подстановке в него аппроксимации поля перемещений в форме (6):

$$R_s \left( \sum_{i=1}^N \phi_i(x) \cdot d_i \right) = F(u) + b - \rho \ddot{u} - c \dot{u}. \tag{8}$$

Минимизация достигается путем ортогонализации невязки по отношению к весовым функциям ядра  $\omega$ :

$$\int_{\Omega} \omega_I(x) \cdot R_s \left( \sum_{i=1}^N \phi_i(x) \cdot d_i \right) d\Omega = 0, \tag{9}$$

где  $I=1, \dots, N$ . Здесь  $\omega_I(x)$  — весовая функция ядра для узла  $I$ . Интегрирование выполняется численно методом Гаусса по узловым точкам.

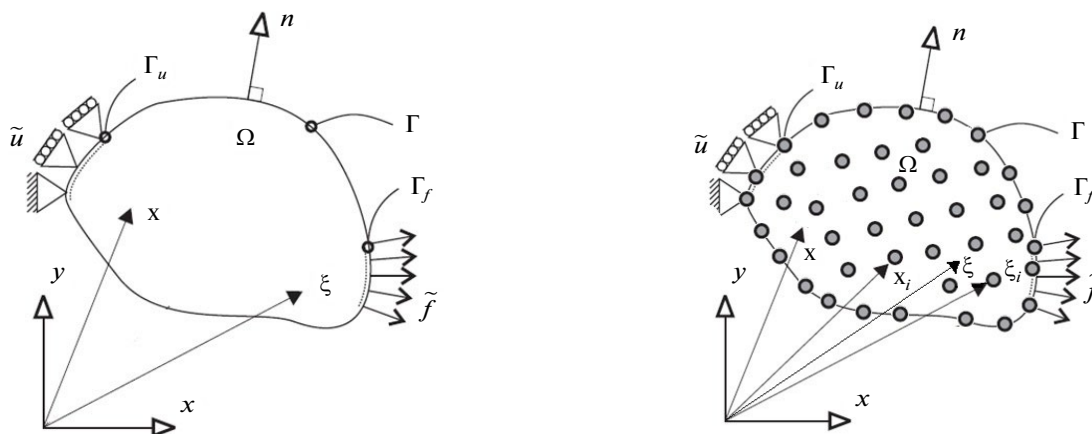


Рис. 8. Расчетная модель бессеточного метода задачи механики деформируемого твердого тела, по материалам работ авторов [35, 36].  
Fig. 8. A computational meshless model to solve the solids mechanics problem based on materials from [35, 36].

## Построение дискретной формы граничных условий (ГУ)

Невязка от ограничения по перемещениям, получаемая в результате подстановки в уравнение (2) аппроксимации поля перемещений (6), имеет вид:

$$R_u \left( \sum_{i=1}^N \phi_i(x) \cdot d_i \right) = u - \bar{u}. \quad (10)$$

Ее ортогонализация весовыми функциями ядра  $\omega$  дает соотношение:

$$\int_{\Gamma} \omega_I(x) R_u \left( \sum_{i=1}^N \phi_i(x) \cdot d_i \right) d\Gamma = 0, \quad (11)$$

где  $I=1, \dots, N$ . Здесь  $\omega_I(x)$  — весовая функция ядра для узла  $I$ . Интегрирование выполняется численно по узловым точкам.

Для получения системы разрешающих уравнений условия (10) и (11) объединяют, умножая второе слагаемое на штрафной коэффициент  $\alpha$ :

$$\int_{\Omega} \omega_I(x) \cdot R_u \left( \sum_{i=1}^N \phi_i(x) d_i \right) d\Omega + \alpha \int_{\Gamma} \omega_I(x) \cdot R_u \left( \sum_{i=1}^N \phi_i(x) d_i \right) d\Gamma = 0. \quad (12)$$

## Учет нелинейных и динамических эффектов

Нелинейное поведение тела при деформировании, которое связано с локальным нарушением целостности, изменением физических свойств материала и большими деформациями, приводит к необходимости решения нелинейной системы алгебраических уравнений относительно узловых параметров  $d_i$ . Здесь, как и в известных численных процедурах, используются итерационные методы, например, метод Ньютона-Рафсона.

Моделирование локального разрушения материала реализуется в результате разрыва связи между соседними узлами путем обнуления пересекающихся функций формы при достижении на некоторой итерации заданного феноменологического критерия разрушения (например, превышение деформации критического значения).

Решение нестационарной динамической задачи с помощью численных процедур требует проведения не только рассмотренной пространственной дискретизации, но и временной. В бессеточных методах, также, как и в методе конечных элементов (МКЭ), используется разделение переменных, т.е.:

$$u(x, t) = \sum_{i=1}^N \phi_i(x) \cdot d_i(t). \quad (13)$$

Дискретизация по времени узловых параметров проводится с помощью метода центральных разностей (МЦР), возможно также применение и других процедур, например, метода Ньюмарка.

## РАЗРАБОТКА И АПРОБАЦИЯ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ МЕХАНИЧЕСКОГО ПОВЕДЕНИЯ ЛЬДА

На базе метода сглаженных частиц (SPG) и современных подходах механики повреждаемых сред авторами разработана математическая модель, способная описывать (воспроизводить) механическое поведение льда в широком диапазоне изменения внешних воздействий [35, 36]. В качестве модели материала (льда) используется феноменологическая модель динамического разрушения Джонсона-Холмквиста (сокращенно JH-2 модель) [37, 38].

### Численное моделирование механических испытаний в квазистатическом режиме

В рамках разработанной модели проведено численное моделирование механических испытаний ледовых образцов в квазистатическом режиме, что позволило исследовать процессы деформации и разрушения льда при низких скоростях нагружения, рис. 9. Моделирование в этом режиме было выполнено для воспроизведения условий, в которых инерционные эффекты минимальны, а развитие напряжений и деформаций происходит постепенно [35, 36].

При низких скоростях нагружения  $v < 1$  мм/с лед проявляет способность к медленному накоплению повреждений и развитию микротрещин. При продолжительном квазистатическом нагружении может наблюдаться вязкое разрушение — процесс, при котором трещины в ледовой среде развиваются медленно, а разрушение происходит не мгновенно, а с задержкой, под воздействием постоянного напряжения. В этом режиме разрушение льда имеет плавный характер и связано с процессами ползучести, релаксации напряжений и перераспределения нагрузок в материале.

При увеличении скорости нагружения  $v > 1$  мм/с ледовая среда переходит от вязкопластического поведения к хрупкому режиму разрушения. В этом режиме деформации не успевают релаксировать, что приводит к быстрому нарастанию напряжений и внезапному образованию трещин. Хрупкий режим разрушения характеризуется резким и катастрофическим развитием трещин, что значительно снижает способность льда выдерживать нагружение и ускоряет процесс его разрушения.

Характерные кривые деформирования для хрупкого режима разрушения представлены на рис. 9, а. Можно видеть, что в условиях квази-статичности зависимость, в основном, линейная и разрушение происходит практически мгновенно при достижении критического напряжения. При этом в процессе нагружения наблюдается многократная силовая разгрузка образца, связанная с зарождением (инициализацией), накоплением и последующим распространением повреждений (выделено черным на рис. 9). Фрагмент процесса распространения

повреждений при квазистатическом нагружении представлен на рис. 9, *b*. Можно видеть, что повреждения в образце прорастают вертикально, а разрушение сопровождается образованием магистральных, раскалывающих образец трещин, что подтверждается экспериментальными исследованиями [35, 36].

### Численное моделирование механических испытаний в динамическом режиме

При динамическом нагружении ( $v=1$  м/с) ледовая среда испытывает значительные инерционные эффекты, что ускоряет процесс разрушения. В зоне хрупкого разрушения лед практически не проявляет пластических деформаций, а трещинообразование происходит резко и распространяется с высокой скоростью, рисунок 10. Это приводит к хрупкому отколу больших фрагментов материала. В отличие от квазистатического режима, при динамическом воздействии лед не успевает перераспределить напряжения, что делает его менее устойчивым к разрушению и вызывает внезапные структурные изменения.

Можно видеть (рис. 10, *a*), что в отличие от квазистатического режима при динамическом сжатии образец не претерпевает полного разрушения, а, наоборот, имеет значительную несущую способность даже после достижения критического напряжения. Фрагмент процесса распространения повреждений при динамическом нагружении представлен на рис. 10, *b*. Можно видеть, что повреждения в образце инициализируются и распространяются уже в докритическом состоянии. При этом фронт разрушения зарождается на поверхности контакта образца с движущейся плитой, и распространяется вглубь

материала. Раздробленный лед вытесняется за пределы сжимающей плиты. Перечисленные ключевые особенности механического поведения ледовой среды в условиях скоростного нагружения подтверждаются экспериментальными исследованиями [35, 36].

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящей работе представлен обзор и обобщение ключевых работ по применению численного моделирования в задачах прикладной механики льда, проанализированы достоинства и недостатки современных численных методов, а также обозначены границы их применимости. По результатам проведенных исследований, авторами предложена математическая модель механического поведения льда, разработанная на базе парадигмы бессеточных методов МДТТ (метод сглаженных частиц Галеркина, SPG). В качестве модели материала используется модель динамического разрушения Джонсона-Холмквиста (JH-2), способная феноменологически описывать механическое поведение льда в широком диапазоне изменения внешних воздействий. Предложенная математическая модель апробирована на базе стандартных механических испытаний ледовых образцов в квазистатическом и динамическом режимах нагружения. Полученные результаты численного моделирования качественно и количественно находятся в согласии с экспериментальными исследованиями, что свидетельствует о корректности и непротиворечивости разработанной численной модели. Указанная модель после более обширной апробации может найти применение для моделирования взаимодействия льда с деталями и конструкциями ледостойких сооружений и машин.

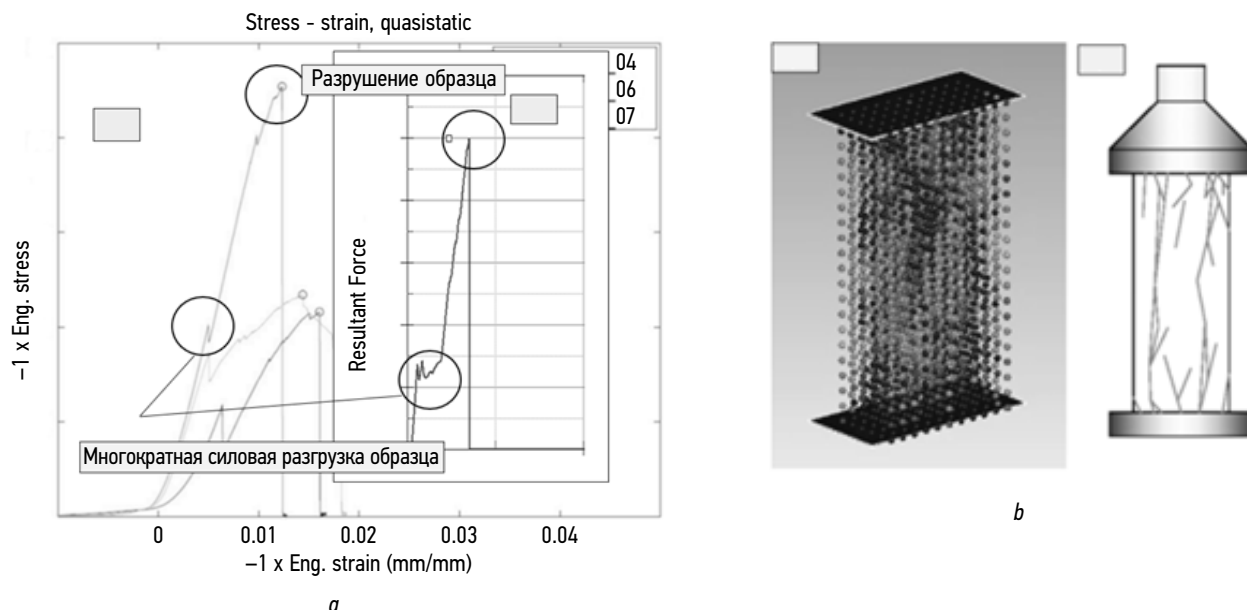


Рис. 9. Численное моделирование квазистатических испытаний на одноосное сжатие ( $v=1$  см/с): *a* — кривые деформирования (зона хрупкого разрушения); *b* — характерная картина распространения повреждений, по материалам работ авторов [35, 36]. Метод SPG.

Fig. 9. Numerical modeling of quasi-static uniaxial compression tests ( $v=1$  cm/s): *a*, deformation curves (brittle zone); *b*, typical pattern of damage propagation based on materials from [35, 36]. SPG method.

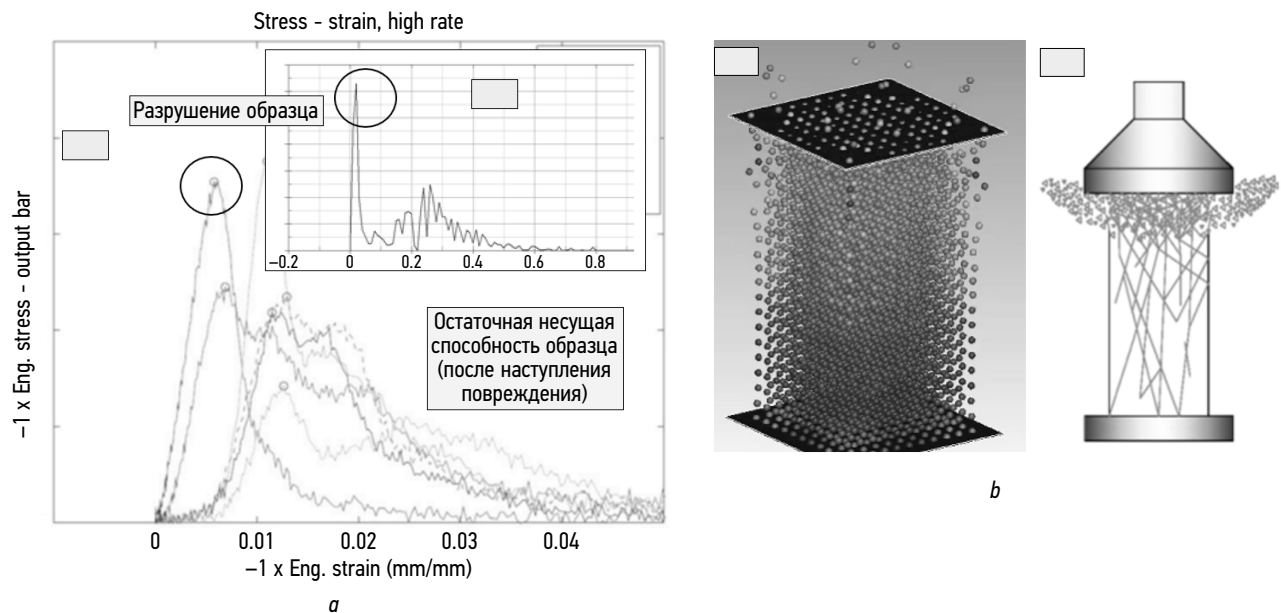


Рис. 10. Численное моделирование динамических испытаний на одноосное сжатие ( $v=1$  м/с): *a* — кривые деформирования (зона хрупкого разрушения); *b* — характерная картина распространения повреждений, по материалам работ авторов [35, 36]. Метод SPG.

Fig. 10. Numerical modeling of dynamic uniaxial compression tests ( $v=1$  m/s): *a*, deformation curves (brittle zone); *b*, typical pattern of damage propagation based on materials from [35, 36]. SPG method.

## ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ИНФОРМАЦИЯ

**Вклад авторов.** А.А. Родионов — редактирование текста рукописи; С.В. Рябушкин — написание текста рукописи. Все авторы одобрили рукопись (версию для публикации), а также согласились нести ответственность за все аспекты работы, гарантируя надлежащее рассмотрение и решение вопросов, связанных с точностью и добросовестностью любой её части.

**Источники финансирования.** Авторы заявляют об отсутствии внешнего финансирования при проведении исследования.

**Конфликт интересов.** Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией настоящей статьи.

**Генеративный искусственный интеллект.** При создании настоящей статьи технологии генеративного искусственного интеллекта не использовали.

## ADDITIONAL INFO

**Author contributions:** A.A. Rodionov: writing—review & editing; S.V. Ryabushkin: writing—original draft. All the authors approved the version of the manuscript to be published and agreed to be accountable for all aspects of the work, ensuring that questions related to the accuracy or integrity of any part of the work are appropriately investigated and resolved.

**Funding sources:** The study was not supported by any external sources.

**Disclosure of interests:** The authors have no explicit or potential conflicts of interests associated with the publication of this article.

**Generative AI:** No generative artificial intelligence technologies were used to prepare this article.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Политько В.А., Соломатин С.В., Каракозова А.И., Трусков П.А. Совершенствование методов расчета нагрузок от воздействия льда на гидротехнические сооружения // Вестник МГСУ. 2020. Т. 15. Вып. 5. С. 701–711. EDN: FDNHQC doi: 10.22227/1997-0935.2020.5.701-711
2. Gogoladze D.Z., Bekker A.T. Numerical Modeling of the Ice-Conical Structure Interaction Process Using Element Erosion Technique // IOP Conf. Series: Earth and Envir. Sci. 2022. Vol. 988. doi: 10.1088/1755-1315/988/5/052056
3. Cervera M., Barbat G.B., Chiumenti M., Wu J.-Y. Comparative Review of XFEM, Mixed FEM and Phase-Field Models for quasi-brittle cracking // Arch Computat Methods Eng. 2022. Vol. 29. P. 1009–1083. doi: 10.1007/s11831-021-09604-8
4. Mulmule S., Dempsey J. A viscoelastic fictitious crack model for the fracture of sea ice // Mechanics of Time-Dependent Materials. 1997. Vol. 1. P. 331–356. doi: 10.1023/A:1008063516422
5. Mulmule S., Dempsey J. Stress-Separation Curves for Saline Ice Using Fictitious Crack Model // Journal of Engineering Mechanics. 1997. Vol. 123, N. 8. P. 870–877. doi: 10.1061/(ASCE)0733-9399(1997)123:8(870)
6. Li Zhou, Feng Wang, Feng Diao, et al. Simulation of Ice-Propeller Collision with Cohesive Element Method // J. Mar. Sci. Eng. 2019. Vol. 7, N. 10. doi: 10.3390/jmse7100349
7. Коршунов В.А., Мудрик Р.С., Пономарев Д.А., Родионов А.А. Моделирование процессов разрушения льда с использованием методологии

- сцепляющихся элементов // Морские интеллектуальные технологии. 2019. Т. 1, № 4. С. 34–44. EDN: CUYXIY
8. Patil A., Sand B., Cwirzen A., Fransson L. Numerical prediction of ice rubble field loads on the Norströmsgrund lighthouse using cohesive element formulation // *Ocean Engineering*. 2021. Vol. 223, N. 14. doi: 10.1016/j.oceaneng.2021.108638
  9. Makarov A.O., Bekker A.T. Modelling of Ice Impacts Using Cohesive Element Method: Influence of Element Shape // *IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci.* 2021. Vol. 666. doi: 10.1088/1755-1315/666/3/032014
  10. Huerta A., Belytschko T., Fernandez-Mendez S., Rabczuk T. Meshfree Methods. In: *Encyclopedia of Computational Mechanics*. New York: John Wiley & Sons, 2004. Vol. 1. P. 279–309. doi: 10.1002/0470091355.ecm005
  11. Deb D., Pramanik R. Failure process of brittle rock using smoothed particle hydrodynamics // *Journal of Engineering Mechanics*. 2013. Vol. 139, N. 11. P. 1551–1565. doi: 10.1061/(ASCE)EM.1943-7889.0000592
  12. Gray J.P., Monaghan J.J., Swift R.P. SPH elastic dynamics // *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*. 2001. Vol. 190 (49–50). P. 6641–6662. EDN: ARJXXB
  13. Zhang N., Zheng X., Ma Q. Updated Smoothed Particle Hydrodynamics for Simulating Bending and Compression Failure Progress of Ice // *Water*. 2017. Vol. 9, N. 11. P. 3–24. doi: 10.3390/w9110882
  14. Filatov A.R. Outlook for application of smooth particle hydrodynamics for numerical modeling of ice loads // *Transactions of the Krylov State Research Centre*. 2022. N. 2(400). P. 24–39. doi: 10.24937/2542-2324-2022-2-400-24-39
  15. Pan W., Tartakovsky A.M., Monaghan J.J. A smoothed-particle hydrodynamics model for ice-sheet and ice-shelf dynamics // *Journal of Glaciology*. 2012. Vol. 58(208). P. 216–222. doi: 10.3189/2012JoG11J084
  16. Staroszczyk R. SPH Modeling of Sea-ice Pack Dynamics // *Archives of Hydro-Engineering and Environmental Mechanics*. 2017. Vol. 64, N. 2. P. 115–137. doi: 10.1515/heem-2017-0008
  17. Shen H.T., Su J., Liu L. SPH Simulation of River Ice Dynamics // *Journal of Computational Physics*. 2000. Vol. 165, N. 2. P. 752–770. doi: 10.1006/jcph.2000.6639
  18. Wu Y., Hu W., Pan X., Wu C.T. Recent development of Smoothed Particle Galerkin (SPG) Method for Joint Modeling. In: *16th International LS-DYNA Users Conference*, 2020. Berkeley: ANSYS, 2020.
  19. Wu Y., Guo Y., Hu W. An Introduction to the LS-DYNA Smoothed Particle Galerkin Method for Severe Deformation and Failure Analyses in solids. In: *13th LS-DYNA Users Conference*, 2014. Berkeley: ANSYS, 2020.
  20. Wu Y., Wu C.T., Hu W. Parametric and convergence studies of the smoothed particle Galerkin (SPG) method in semi-brittle and ductile material failure analyses. In: *15th International LS-DYNA Users Conference*, 2018. Berkeley: ANSYS, 2020.
  21. Филатов А.Р. Численное моделирование ледовых нагрузок бессеточными методами SPH и SPG // *Труды Крыловского государственного научного центра*. 2022. С. 7–10. EDN: TVIADE doi: 10.24937/2542-2324-2022-1-S-1-7-10
  22. Tong Z. et al. Simulation analysis on collision performance of polar cruise vessel based on JH-2 sea ice mod-el // *Chinese Journal of Ship Research*. 2021. Vol. 16, N. 5. P. 87–94.
  23. Гриневич Д.В. Обзор применения численных методов для моделирования деформации и разрушения льда // *Труды ВИАМ*. 2020. №8 (90). С. 109–122. EDN: WQNHTP doi: 10.18577/2307-6046-2020-0-8-109-122
  24. Williams J.R. et al. The Theoretical Basis of the Discrete Element Method. In: *Proceedings from Conference Numerical Methods of Engineering, Theory and Applications*. 1985. P. 897–906.
  25. Cundall P.A., Strack O.D.L. A discrete numerical model for granular assemblies // *Géotechnique*. 1979. N. 29(1). P. 47–65. doi: 10.1680/geot.1979.29.1.47
  26. Potyondy D.O., Cundall P.A. A bonded-particle model for rock // *Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. 2004. Vol. 41, N. 8. P. 1329–1364. doi: 10.1016/j.ijrmms.2004.09.011
  27. Ji S., Di S., Long X. DEM Simulation of Uniaxial Compressive and Flexural Strength of Sea Ice: Parametric Study // *Journal of Engineering Mechanics*. 2017. Vol. 143, N. 1. P. 4–11. doi: 10.1061/(ASCE)EM.1943-7889.0000996
  28. Ji S. Discrete Element Modeling of Ice Loads on Ship and Offshore Structures. In: Li, X., Feng, Y., Mustoe, G. (eds) *Proceedings of the 7th International Conference on Discrete Element Methods. DEM 2016. Springer Proceedings in Physics*. Singapore: Springer, 2017. Vol. 188. doi: 10.1007/978-981-10-1926-5\_6
  29. Jou O., Celigueta M.A. A bonded discrete element method for modeling ship-ice interactions in broken and unbroken sea ice fields // *Comp. Part. Mech.* 2019. Vol. 6, N. 6. P. 739–765, doi: 10.1007/s40571-019-00259-8
  30. Hu B., Liu L., Wang Dy, et al. GPU-Based DEM Simulations of Global Ice Resistance on Ship Hull During Navigation in Level Ice // *China Ocean. Eng.* 2021. Vol. 35. P. 228–237. doi: 10.1007/s13344-021-0020-5
  31. Hissette Q., Alekseev A., Seidel J. Discrete Element Simulation of Ship Breaking Through Ice Ridges. In: *Proceedings from the 27th International Ocean and Polar Engineering Conference*. San Francisco: ISOPE, 2017. P. 1–15.
  32. Neto A.V. Improvement of Rubble Ice Generation in Numerical Simulation of Ice Ridge and Structure Interaction. [Master thesis] Liège, 2017.
  33. Polojärvi A. Sea ice ridge keel punch through experiments: model experiments and numerical modeling with discrete and combined finite-discrete element methods [Doctoral theses] Espoo, 2013.
  34. Tuhkuri J., Polojärvi A. A review of discrete element simulation of ice-structure interaction // *Philosophical transactions. Series A: Mathematical, physical, and engineering sciences*. 2018. Vol. 376, N. 2129. doi: 10.1098/rsta.2017.0335
  35. Родионов А.А., Рябушкин С.В. Использование бессеточных процедур для численного моделирования механического поведения льда в широком диапазоне внешних воздействий // *Морские интеллектуальные технологии*. 2024. № 3-2(65). С. 83–94. EDN: GJPHAD doi: 10.37220/MIT.2024.65.3.011
  36. Родионов А.А., Рябушкин С.В. Численное моделирование механического поведения льда при квазистатических и динамических нагрузках // *Морские интеллектуальные технологии*. 2023. № 4-2. С. 99–105. EDN: KSEFLM doi: 10.37220/MIT.2023.62.4.051
  37. Johnson G.R., Holmquist T.J. An improved computational constitutive model for brittle materials // *AIP Conf. Proc.* 1994. Vol. 309. P. 981–984. doi: 10.1063/1.46199
  38. Gazonas G. Implementation of Johnson-Holmquist II (JH-2) Constitutive Model into DYNA3D. Aberdeen: Army Research Laboratory, 2002.

## REFERENCES

1. Politko VA, Solomatin SV, Karakozova AI, Truskov PA. Improving calculation methods taking into account the impact of ice on hydraulic structures. *Vestnik MGSU*. 2020;15(5):701–711. (In Russ.) EDN: FDNHQC doi: 10.22227/1997-0935.2020.5.701-711
2. Gogoladze DZ, Bekker AT. Numerical Modeling of the Ice-Conical Structure Interaction Process Using Element Erosion Technique. *IOP Conf. Series: Earth and Envir. Sci.* 2022;988. doi: 10.1088/1755-1315/988/5/052056
3. Cervera M, Barbat GB, Chiumenti M, Wu J-Y. Comparative Review of XFEM, Mixed FEM and Phase-Field Models for quasi-brittle cracking. *Arch Computat Methods Eng.* 2022;29:1009–1083. doi: 10.1007/s11831-021-09604-8
4. Mulmule S, Dempsey J. A viscoelastic fictitious crack model for the fracture of sea ice. *Mechanics of Time-Dependent Materials*. 1997;1:331–356. doi: 10.1023/A:1008063516422
5. Mulmule S, Dempsey J. Stress-Separation Curves for Saline Ice Using Fictitious Crack Model. *Journal of Engineering Mechanics*. 1997;123(8):870–877. doi: 10.1061/(ASCE)0733-9399(1997)123:8(870)
6. Li Zhou, Feng Wang, Feng Diao, et al. Simulation of Ice-Propeller Collision with Cohesive Element Method. *J. Mar. Sci. Eng.* 2019;7(10). doi: 10.3390/jmse7100349
7. Korshunov VA, Mudrik RS, Ponomarev DA, Rodionov AA. Modeling of ice destruction processes using the methodology of interlocking elements. *Morskije intellektualnye tekhnologii*. 2019;1(4):34–44. (In Russ.) EDN: CUYXIY
8. Patil A, Sand B, Cwirzen A, Fransson L. Numerical prediction of ice rubble field loads on the Norströmsgrund lighthouse using cohesive element formulation. *Ocean Engineering*. 2021;223(14). doi: 10.1016/j.oceaneng.2021.108638



9. Makarov AO, Bekker AT. Modelling of Ice Impacts Using Cohesive Element Method: Influence of Element Shape. *IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci.* 2021;666. doi: 10.1088/1755-1315/666/3/032014
10. Huerta A, Belytschko T, Fernandez-Mendez S, Rabczuk T. *Meshfree Methods. In: Encyclopedia of Computational Mechanics.* New York: John Wiley & Sons; 2004;1:279–309. doi: 10.1002/0470091355.ecm005
11. Deb D, Pramanik R. Failure process of brittle rock using smoothed particle hydrodynamics. *Journal of Engineering Mechanics.* 2013;139(11):1551–1565. doi: 10.1061/(ASCE)EM.1943-7889.0000592
12. Gray JP, Monaghan JJ, Swift RP. SPH elastic dynamics. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering.* 2001;190(49–50):6641–6662. EDN: ARJXJB
13. Zhang N, Zheng X, Ma Q. Updated Smoothed Particle Hydrodynamics for Simulating Bending and Compression Failure Progress of Ice. *Water.* 2017;9(11):3–24. doi: 10.3390/w9110882
14. Filatov AR. Outlook for application of smooth particle hydrodynamics for numerical modeling of ice loads. *Transactions of the Krylov State Research Centre.* 2022;2(400):24–39. doi: 10.24937/2542-2324-2022-2-400-24-39
15. Pan W, Tartakovsky AM, Monaghan JJ. A smoothed-particle hydrodynamics model for ice-sheet and ice-shelf dynamics. *Journal of Glaciology.* 2012;58(208):216–222. doi: 10.3189/2012JoG11J084
16. Staroszczyk R. SPH Modeling of Sea-ice Pack Dynamics. *Archives of Hydro-Engineering and Environmental Mechanics.* 2017;64(2):115–137. doi: 10.1515/heem-2017-0008
17. Shen HT, Su J, Liu L. SPH Simulation of River Ice Dynamics. *Journal of Computational Physics.* 2000;165(2):752–770. doi: 10.1006/jcph.2000.6639
18. Wu Y, Hu W, Pan X, Wu CT. Recent development of Smoothed Particle Galerkin (SPG) Method for Joint Modeling. In: *16th International LS-DYNA Users Conference*; 2020. Berkeley: ANSYS, 2020.
19. Wu Y, Guo Y, Hu W. An Introduction to the LS-DYNA Smoothed Particle Galerkin Method for Severe Deformation and Failure Analyses in Solids. In: *13th LS-DYNA Users Conference*; 2014. Berkeley: ANSYS, 2020.
20. Wu Y, Wu CT, Hu W. Parametric and convergence studies of the smoothed particle Galerkin (SPG) method in semi-brittle and ductile material failure analyses. In: *15th International LS-DYNA Users Conference, 2018.* Berkeley: ANSYS; 2020.
21. Filatov AR. Numerical modeling of ice loads using meshless SPH and SPG methods. *Transactions of the Krylov State Research Centre.* 2022;S1:7–10. (In Russ.) EDN: TVIADE doi: 10.24937/2542-2324-2022-1-S-1-7-10
22. Tong Z, et al. Simulation analysis on collision performance of polar cruise vessel based on JH-2 sea ice mod-el. *Chinese Journal of Ship Research.* 2021;16(5):87–94.
23. Grinevich DV. Review of the application of numerical methods for modeling ice deformation and destruction. *Trudy VIAM.* 2020;8(90):109–122. (In Russ.) EDN: WQNHTP doi: 10.18577/2307-6046-2020-0-8-109-122
24. Williams JR, et al. The Theoretical Basis of the Discrete Element Method. In: *Proceedings from Conference Numerical Methods of Engineering, Theory and Applications.* 1985:897–906.
25. Cundall PA, Strack ODL. A discrete numerical model for granular assemblies. *Géotechnique.* 1979;29(1):47–65. doi: 10.1680/geot.1979.29.1.47
26. Potyondy DO, Cundall PA. A bonded-particle model for rock. *Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences.* 2004;41(8):1329–1364. doi: 10.1016/j.ijrmms.2004.09.011
27. Ji S, Di S, Long X. DEM Simulation of Uniaxial Compressive and Flexural Strength of Sea Ice: Parametric Study. *Journal of Engineering Mechanics.* 2017;143(1):4–11. doi: 10.1061/(ASCE)EM.1943-7889.0000996
28. Ji S. Discrete Element Modeling of Ice Loads on Ship and Offshore Structures. In: *Li, X., Feng, Y., Mustoe, G. (eds) Proceedings of the 7th International Conference on Discrete Element Methods. DEM 2016. Springer Proceedings in Physics.* Singapore: Springer; 2017;188. doi: 10.1007/978-981-10-1926-5\_6
29. Jou O, Celigueta MA. A bonded discrete element method for modeling ship-ice interactions in broken and unbroken sea ice fields. *Comp. Part. Mech.* 2019;6(6):739–765. doi: 10.1007/s40571-019-00259-8
30. Hu B, Liu L, Wang D, et al. GPU-Based DEM Simulations of Global Ice Resistance on Ship Hull During Navigation in Level Ice. *China Ocean. Eng.* 2021;35:228–237. doi: 10.1007/s13344-021-0020-5
31. Hissette Q, Alekseev A, Seidel J. Discrete Element Simulation of Ship Breaking Through Ice Ridges. In: *Proceedings from the 27th International Ocean and Polar Engineering Conference.* San Francisco: ISPE; 2017:1–15.
32. Neto AV. Improvement of Rubble Ice Generation in Numerical Simulation of Ice Ridge and Structure Interaction. [Master thesis] Liège; 2017.
33. Polojärvi A. Sea ice ridge keel punch through experiments: model experiments and numerical modeling with discrete and combined finite-discrete element methods [Doctoral theses] Espoo; 2013.
34. Tuhkuri J, Polojärvi A. A review of discrete element simulation of ice-structure interaction. *Philosophical transactions. Series A: Mathematical, physical, and engineering sciences.* 2018;376(2129). doi: 10.1098/rsta.2017.0335
35. Rodionov AA, Ryabushkin SV. Use of meshless procedures for numerical modeling of mechanical behavior of ice in a wide range of external influences. *Morskie intelektualne tekhologii.* 2024;3-2(65):83–94. (In Russ.) EDN: GJPHAD doi: 10.37220/MIT.2024.65.3.011
36. Rodionov AA, Ryabushkin SV. Numerical modeling of mechanical behavior of ice under quasi-static and dynamic loads. *Morskie intelektualnye tekhologii.* 2023;4-2:99–105. (In Russ.) EDN: KSEFLM doi: 10.37220/MIT.2023.62.4.051
37. Johnson GR, Holmquist TJ. An improved computational constitutive model for brittle materials. *AIP Conf. Proc.* 1994;309:981–984. doi: 10.1063/1.461199
38. Gazonas G. *Implementation of Johnson-Holmquist II (JH-2) Constitutive Model into DYNA3D.* Aberdeen: Army Research Laboratory; 2002.

## ОБ АВТОРАХ

**Александр Александрович Родионов**, д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедры строительной механики корабля, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет; eLibrary SPIN: 1637-9588; e-mail: rodionovsmk@yandex.ru

\***Сергей Владимирович Рябушкин**, аспирант кафедры строительной механики корабля, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет; адрес: 190121, Санкт-Петербург, ул. Лощманская, 10; e-mail: serg.ryabuschkina@yandex.ru

## AUTHORS' INFO

**Aleksandr A. Rodionov**, Dr. Sci. (Engineering), Professor, Head of the Department of Ship Mechanics, Saint Petersburg State Marine Technical University; eLibrary SPIN: 1637-9588; e-mail: rodionovsmk@yandex.ru

\***Sergey V. Ryabushkin**, graduate student, Department of Ship Mechanics, Saint Petersburg State Marine Technical University; address: Lotsmanskaya, 10, Saint Petersburg, 190121, Russia; e-mail: serg.ryabuschkina@yandex.ru

\* Автор, ответственный за переписку / Corresponding author

Оригинальное исследование

УДК 621.793

DOI: [https://doi.org/10.52899/24141437\\_2025\\_02\\_229](https://doi.org/10.52899/24141437_2025_02_229)

EDN: WXEKSD

# Применение текстурирования поверхности для повышения ресурсных характеристик инструмента

Н.А. Астафьева, А.Е. Балановский

Иркутский национальный исследовательский технический университет, Иркутск, Россия

## АННОТАЦИЯ

**Обоснование.** Каждая операция механической обработки металлов сталкивается с трудностями, связанными с локализацией тепла в зоне резания и приводящими к различным проблемам, таким как износ инструмента, увеличение шероховатости поверхности и др. На сегодняшний день актуально искать экологически значимые и экономически выгодные решения, применяя технологии, позволяющие сократить или исключить использование смазочно-охлаждающих материалов. Текстурирование поверхности оказалось одним из многообещающих методов, позволяющих улучшить трибологические свойства рабочей поверхности инструментов. Микротекстуры могут иметь различные геометрические параметры и форму и, как правило, создаются либо на боковой поверхности, либо на передней поверхности режущего инструмента. Качество текстуры во многом зависит от используемых производственных процессов. Основными механизмами улучшения трибологических свойств являются улавливание стружки, сокращение длины контакта и улучшение смазывающей способности, что в конечном итоге помогает снизить силу резания, уменьшить износ инструмента и шероховатость поверхности обрабатываемого материала. Известно, что при сверлении режущее действие происходит внутри отверстия, минимизация эффекта трения на контактных границах инструмента и заготовки всегда является сложной задачей, поскольку доступность смазочно-охлаждающих жидкостей в зоне обработки затруднена восходящим движением стружки, скользящей по поверхности канавки. Эту проблему можно решить путем функционализации поверхностей сверлильного инструмента с помощью микротекстур.

**Цель работы.** В настоящей работе для снижения трения скольжения используется сверлильный инструмент с микротекстурами на стороне канавки и кромки, полученными с применением лазерной обработки.

**Методы.** Оценка влияния геометрических параметров (радиус, глубина, расположение) микротекстур на износ при трении скольжения проводилась на основе лабораторных и натуральных испытаний.

**Выводы.** Было обнаружено, что текстурированный инструмент более эффективен, чем нетекстурированный. Установлено, что основными механизмами, отвечающими за улучшение эксплуатационных характеристик сверлильных инструментов с микротекстурированными рабочими поверхностями, являются сокращение длины контакта, захват продуктов износа и образование эффекта микрослоя смазки в режиме резания. Результаты исследования будут полезны для дальнейшего развития данной темы.

**Ключевые слова:** инструмент; лазерная обработка; микротекстуры; поверхность; трение скольжения.

## Как цитировать

Астафьева Н.А., Балановский А.Е. Применение текстурирования поверхности для повышения ресурсных характеристик инструмента // Труды Санкт-Петербургского государственного морского технического университета. 2025. Т. 4, № 2. С. 229–236. DOI: 10.52899/24141437\_2025\_02\_229 EDN: WXEKSD

Original study article

DOI: [https://doi.org/10.52899/24141437\\_2025\\_02\\_229](https://doi.org/10.52899/24141437_2025_02_229)

EDN: WXEKSD

# Tool Life Improvement by Surface Texturing

Natalia A. Astafeva, Andrey E. Balanovsky

Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia

## ABSTRACT

**BACKGROUND:** Every metal machining operation has difficulties associated with heat localized in the cutting area, leading to various problems such as tool wear, increased roughness, etc. Today, it is important to look for environmentally friendly and cost-effective solutions by technologies that reduce or eliminate the use of cooling lubricants. Surface texturing has proven to be a promising method for improving the tribological properties of the tool face. Microtextures can have various geometry and shape and are usually created either on the approach surface or the face of the cutting tool. Texture quality largely depends on the processes. The basic methods for improving tribological properties are chip capturing, contact length reduction, and improved lubricity, which ultimately helps to reduce cutting force, tool wear, and roughness of the workpiece. It is known that, in drilling, the cutting action occurs inside the hole, and it is always difficult to minimize the effect of friction at the interface of the tool and the workpiece as cutting fluids can hardly enter the processing area due to the upward movement of the chips sliding along the groove surface. This problem can be solved by functionalizing the drilling tool surface using microtextures.

**AIM:** In this paper, a drilling tool with microtextures on the groove and edge created by laser machining is used to reduce sliding friction.

**METHODS:** We assessed the influence of geometry (radius, height, and location) of microtextures on wear during sliding friction by laboratory and field tests.

**CONCLUSIONS:** The textured tool was found to be more effective than the non-textured one. The study showed that the main methods allowing to improve the performance of drilling tools with microtextured surfaces are the contact length reduction, the wear debris capturing, and lubrication micro-layering in the cutting mode. The study will be useful for further development of this subject.

**Keywords:** tool; laser machining; microtextures; surface; sliding friction.

## To cite this article

Astafeva NA, Balanovsky AE. Tool Life Improvement by Surface Texturing. *Transactions of the Saint Petersburg State Marine Technical University*. 2025;4(2):229–236. DOI: [10.52899/24141437\\_2025\\_02\\_229](https://doi.org/10.52899/24141437_2025_02_229) EDN: WXEKSD

Submitted: 10.04.2025

Accepted: 21.04.2025

Published online: 26.06.2025

## ВВЕДЕНИЕ

Текстурирование поверхностей режущего инструмента становится одним из перспективных решений для улучшения трибологических характеристик в процессе обработки [1–5]. Инструменты с модифицированной поверхностью получают широкое распространение в обрабатывающей промышленности благодаря улучшенным режущим характеристикам с точки зрения увеличения срока службы инструмента, трибологических характеристик, снижения силы резания, улучшения целостности поверхности и т. д. [3–8]. Понимание обрабатываемости материала в процессе имеет решающее значение для оценки мощности резания и выходных переменных, а также корреляции с износом инструмента. Оценка обрабатываемости учитывает различные выходные переменные, такие как длина контакта стружки инструмента, целостность поверхности (например, шероховатость, микротвердость, остаточное напряжение), сила резания, температура, морфология стружки и срок службы инструмента.

Высокоскоростная обработка или сверхвысокоскоростная обработка привлекает внимание многих исследователей из-за преимуществ, таких как высокая производительность, малая сила резания, высокое качество обработки и низкая удельная мощность резания [1, 2]. Высокая скорость резания неизбежно приводит к высокой температуре резания и высокому давлению / высокому трению в зоне контакта инструмента со стружкой, что приводит к быстрому износу инструмента в процессе резания. Чтобы преодолеть недостатки и продлить срок службы инструмента при высокоскоростной обработке, используется смазка для снижения температуры резания и уменьшения трения между режущим инструментом и материалом заготовки [2, 3].

Исследования, проведенные в работах [2–12], показали, что проникновение смазки в зону резания происходит в основном за счет капиллярного действия через микроскопические проходы, существующие на границе инструмент – стружка [5–8]. Однако эти микроскопические проходы нестабильны и исчезают за очень короткое время, которого недостаточно для проникновения смазки в зону резания. Следовательно, смазочно-охлаждающей жидкости трудно проникнуть в зону резания и образовать эффективную смазочную пленку в процессе высокоскоростной резки [6, 7]. Охлаждающий и смазочный эффект смазки при этом значительно снижается. Для решения этой проблемы в последние годы на переднюю/боковую поверхность режущего инструмента наносят микротекстуру, чтобы облегчить проникновение смазочно-охлаждающих жидкостей и улучшить условия трения на границе между инструментом и стружкой [2–11].

Работы [2–5] показывают, что, с одной стороны, микротекстуры могут улучшить способность смазочно-охлаждающих жидкостей проникать в зону резания, а с другой — микротекстуры могут действовать как резервуары

для смазки, так что смазка может подаваться непосредственно в зону резания и образовывать стабильный граничный слой смазки [2, 3].

В работе [12] описаны опыты по применению пяти типов микротекстур на боковой поверхности инструмента и результаты, доказывающие, что микротекстуры могут улучшить эффективность охлаждения в условиях струйной поддержки охлаждающей жидкости высокого давления. В указанном исследовании была построена функция микротекстур для увеличения турбулентной кинетической энергии и охлаждения текстурированной поверхности инструмента.

В работах [2, 3, 13] продемонстрировали, что улучшение смазки текстурированного режущего инструмента будет способствовать эффекту, когда микроскопические текстуры будут действовать как резервуар смазки, — который достигается за счет капиллярного действия.

В работе [14] применена бионическая текстура на боковой поверхности режущего инструмента и выявлено, что топография поверхности режущего инструмента влияет на качество смазки и, следовательно, на температуру резания.

Однако при наличии большого количества выполненных исследований [2–14] все еще существуют ограничения при проектировании микротекстур с надлежащими параметрами. Количество микрорельефов в рисунке текстуры и их расположение определяют тип рисунка: линейный, случайный или гибридный. Линейный рисунок текстуры характеризуется расположением микрорельефа в линейном направлении, а гибридный рисунок представляет собой комбинацию двух или более текстур, которые могут располагаться линейно или беспорядочно. Большинство исследователей сосредоточились либо на механизмах проникновения смазки в зону резания и образования смазочной пленки, либо на экспериментах по точению с использованием микротекстурированного режущего инструмента для проверки влияния микротекстур на снижение адгезии, снижение сил резания и температуры резания и продление срока службы инструмента. Редко сообщается об оптимизации параметров микротекстур, особенно об оптимизации микротекстур на основе проникающей способности смазки.

Модификация/функционализация поверхностей инструментов может быть достигнута с помощью микроиндентирования, абразивоструйной обработки, лазерной обработки, микрообработки, электроэрозионной и других методов обработки [2, 3, 15–17], которые включают добавление или удаление материала с подложки инструмента. Покрытие поверхностей инструментов является обычной практикой, применяемой в отраслях по производству режущих инструментов последних лет, и, как сообщается [3–5], является одним из наиболее успешных методов улучшения характеристик инструментов.

Анализ имеющейся литературы с использованием каталога Scopus показал, что в период 2009–2023 годов в 5841 статье большая часть исследований проведена в области материаловедения, инженерии. Среди них

было найдено 266 исследований с ключевыми словами «текстурирование поверхности» и «текстурированные инструменты» в области инженерии и материаловедения; 72 % исследований среди вышеуказанных статей основаны на токарной обработке, 17 % — на фрезерной обработке и 11 % — на операциях сверления. Исследователи создали различные узоры текстуры на передней поверхности инструмента, такие как рифленая, ямочная, эллиптическая, ромбовидная, зигзагообразная, кластерная, шевронная текстура [2–12] и т. д. Более того, синергетический эффект покрытия на текстурированном инструменте и, с другой стороны, создание текстуры на ранее покрытой поверхности инструмента исследуются для изучения производительности обработки [2]. Основные характеристики, такие как тип и ориентация узора текстуры, включая его оптимизацию, всё еще недостаточно изучены, и чаще всего выбирается бионическая текстура, из наблюдений в природе, с определенными геометрическими характеристиками [14]. Такие узоры текстуры поверхности могут быть созданы с помощью доступных методов микрообработки [15–17].

В этом исследовании процесс проникновения смазки в сформированные лазерной обработкой микротекстуры на поверхности режущего инструмента анализируется с помощью натуральных и лабораторных испытаний. Лазерное текстурирование — это бесконтактный термический нетрадиционный процесс обработки, используемый для вырезания полостей любого размера и формы на поверхности заготовки. На основе анализа результатов исследования предложена оптимизация масштаба микротекстур.

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Экспериментальная методология, использованная в настоящей работе, состоит из двух частей: испытания на трение скольжения и эксперимента по сверлению. Испытание на трение скольжения было проведено в качестве предварительного эксперимента для обоснования явления

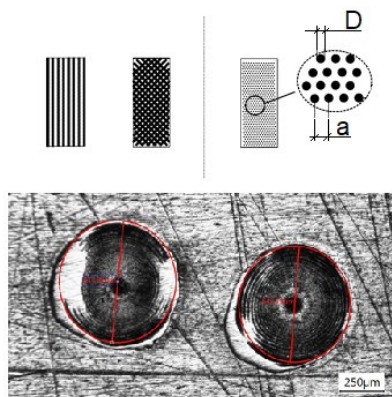


Рис. 1. Примеры микротекстур и их геометрических характеристик:  $D$  — диаметр микроямки;  $a$  — расстояние между микроямками.

Fig. 1. Examples of microtextures and their geometry:  $D$ , micropit diameter;  $a$ , distance between micropits.

снижения трения при использовании микротекстурированных поверхностей в сухих условиях. Для этого на образцах с помощью лазерной обработки были созданы два типа рисунков в виде микроямок и микроканалов (рис. 1). Испытание на трение было проведено в сухих условиях образцов с необработанной поверхностью и со всеми видами обработанных поверхностей с целью понимания влияния микротекстур на управление трением на контактных границах.

Текстурирование стальных поверхностей выполнялось на лазерном комплексе HTS Portal 300S. Тип лазера — импульсно-периодический АИГ,  $\text{Nd}^{3+}$ ,  $\lambda = 1,064$  мкм. Основные параметры: максимальная энергия импульса излучения 100 Дж; максимальная импульсная мощность излучения 12 кВт; частота повторения импульсов излучения 0,5...200 Гц; средняя мощность излучения (макс.) 300 Вт; диаметр сфокусированного луча 0,2...2,0 мм; длительность импульса 0,2–20 мс. Лазер использовался для создания каналов и микроямок глубиной 10–60 мкм на поверхностях полированных образцов. Ширина каналов и расстояние между ними были установлены 100 мкм. Были образованы каналы с параллельной, перпендикулярной, а также пересекающейся ориентацией.

Для получения микроямок с определенными свойствами несколько лазерных импульсов подавали на поверхность (импульсный режим). Параметры лазерной обработки: напряжение 300–400 В; длительность 0,75 мс; частота 1–4 Гц. Диаметр микроямок был установлен в диапазоне 90–400 мкм и зависел от параметров обработки. Расстояние между ними варьировалось для получения различных долей структурированной площади поверхности. Для создания микротекстур в виде круглых углублений на канавке и ленточке сверла была опробована технология лазерной микрообработки с различной плотностью заполнения: 10, 20, 30 и 40 %.

Образцы шлифовались до плоскостности, полировались алмазной суспензией до размера частиц 1 мкм и распиливались до требуемого размера. После полировки качество поверхности образцов характеризовалось с помощью профилометрии щупом с радиусом кончика щупа 5 мкм. Среднее арифметическое значение шероховатости поверхности составляло  $R_a = 0,02$  мкм для полированных стальных поверхностей. Эти пластины использовались в качестве контрольных образцов для трибологических испытаний. Образцы, обработанные таким образом, также служили исходным материалом для лазерного текстурирования. Геометрические характеристики микроямок и микробороздок, полученных на образцах для испытаний, определяли с применением 3D-оптического профилометра Bruker Contour GT-K1. На образцах были получены микротекстуры в виде микроямок (средний диаметр 90 мкм, глубина 60 мкм и шаг 135 мкм) и бороздок (средняя ширина 50 мкм, глубина 40 мкм и шаг 135 мкм). Трибологические испытания проводились с использованием трибометра «цилиндр на пластине» в сухом состоянии при нормальной нагрузке 10 Н с диском, вращающимся со скоростью

2387 об/мин (1 м/с) в течение времени скольжения 120 с. Для микрорифленых поверхностей выравнивание штифта производилось перпендикулярно направлению рифления. Эксперименты по сверлению проводились на вертикальном обрабатывающем центре путем сверления отверстия глубиной 10 мм в стали 09Г2С и сплаве ВТ-6 с использованием инструментов с текстурированной и не текстурированной рабочей поверхностью в сухих условиях и с применением СОЖ. Использовались обычные спиральные сверла диаметром 8 мм из высоколегированной стали, углом наклона винтовой линии  $30^\circ$  и углом при вершине  $118^\circ$ . Толщина листа 10 мм. Была проведена серия испытаний по сверлению, в ходе которых три сверла каждого типа использовались для сверления набора отверстий с постоянной подачей 24,9 мм в минуту и постоянной скоростью 245 оборотов в минуту. Эти параметры были выбраны для обеспечения скорости сцепления рабочего материала с базовыми сверлами, чтобы можно было легко идентифицировать воздействия, вызванные текстурированием. Сначала сверла были погружены в смазку на 15 с, после чего было просверлено отверстие в пластине толщиной 10 мм. Визуальные проверки проводились каждые 10–15 отверстий. Отверстия сверлились каждым сверлом до тех пор, пока не наступал отказ. Было выполнено трехкратно пять последовательных отверстий с использованием каждого типа инструмента. При сверлении смазочно-охлаждающие жидкости подавались в зону обработки с расходом 200 мл/ч.

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ОБСУЖДЕНИЕ

В результате исследований установлено, что, регулируя параметры лазерной обработки, такие как частота повторения импульсов, средняя мощность импульса, длительность импульса, возможно получать различные геометрические характеристики текстурированной поверхности и менять плотность заполнения площади. На рис. 2 представлены результаты определения геометрических параметров микротекстуры поверхности. В данной работе

следует отметить, что глубина микрорельефа характеризовалась расстоянием от самой глубокой нижней поверхности до исходной поверхности образца.

Трибологические испытания выявили значительное снижение коэффициента трения для микротекстурированных поверхностей по сравнению с нетекстурированными образцами для испытаний. На начальном этапе наблюдался быстрый рост коэффициента трения для всех испытуемых образцов, который постепенно становился стабильным после 10 с скольжения. Этот стабильный период учитывался при оценке для всех испытуемых образцов. Сдавливательное действие захваченных частиц износа на поверхности скольжения образует пятна сильной деформации, что отражается в профиле коэффициента трения, вызывая незначительные колебания для всех испытуемых образцов. В условиях сухого скольжения средний коэффициент трения 0,49 был зарегистрирован в случае гладкой поверхности (без каких-либо микротекстур), тогда как для текстурированной поверхности с микроямочками снизился до 0,42.

Лучший результат был зарегистрирован в случае рифленых поверхностей — со средним значением 0,41. Более высокий коэффициент трения для нетекстурированных поверхностей обусловлен доминированием контакта неровностей на микроскопическом уровне, на который влияют превосходные взаимодействия материалов. В то время как в случае текстурированных поверхностей уменьшение площади контакта способствовало лучшему скольжению с уменьшенным эффектом трения. Результаты испытаний образцов с ямочками — размером 80 мкм — представлены на рис. 3. Для случаев, когда плотность ямочек составляла 15 и 25 %, были успешно реализованы сниженные коэффициенты трения во всем диапазоне тестируемых скоростей скольжения. В частности, в случае плотности ямок 15 %, очевидное снижение трения было достигнуто также в очень низком диапазоне скоростей скольжения, около 0,01 м/с, что может способствовать предотвращению аномального повышения температуры в начале испытаний (на стадии приработки). Напротив, в случае плотности ямок 40 % коэффициенты трения были немного выше, чем для образца без текстуры.

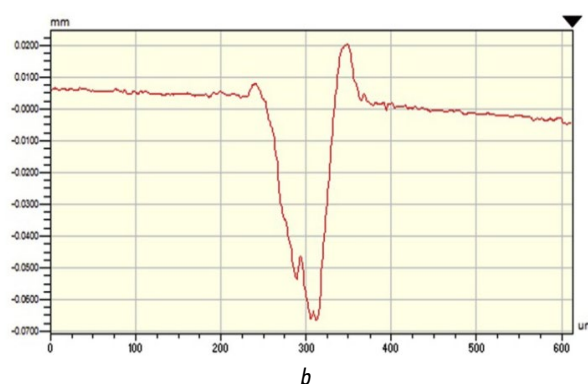
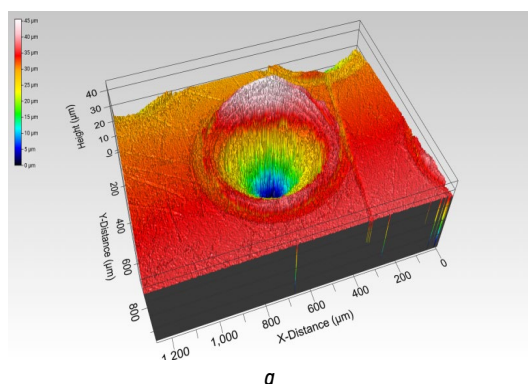


Рис. 2. Геометрические параметры микротекстуры поверхности: *a* — 3D-профиль текстуры на поверхности; *b* — параметры глубины микротекстуры.

Fig. 2. Geometry of surface microtexture: *a*, 3D surface texture profile; *b*, microtexture height.

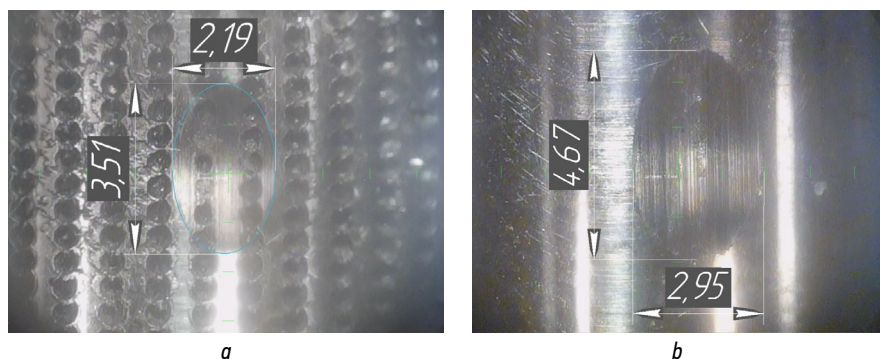


Рис. 3. Пятно контакта: *a* — текстурированная поверхность контакта; *b* — не текстурированная поверхность.

Fig. 3. Contact patch: *a*, textured interface; *b*, non-textured surface.

Предполагается, что это связано с тем, что по мере увеличения площади поверхности, занимаемой ямками, и увеличением их плотности фактическая поверхность контакта уменьшается, что приводит к увеличению фактического контактного давления на поверхности скольжения, что оказывает отрицательное влияние на фрикционные свойства. Для образцов с ямочками размером 120 мкм пятно контакта 1,68 на 2,95 мм (рис. 4).

При таких текстурах снижение коэффициента трения по сравнению с поверхностью без ямочек составило примерно 20 %. Кроме того, небольшое снижение трения было достигнуто и в случае плотности ямочек 30 %, несмотря на описанный выше отрицательный эффект. Считается, что полезный эффект микроямочек становится больше с увеличением размера ямочки. Таким образом, было подтверждено (рис. 5), что текстурирование поверхности имеет большой потенциал для снижения трения в условиях граничной смазки, если микроямки распределены в соответствующем шаблоне.

Карты топографии поверхности участков после испытаний, выполненные при нагрузке 2,94 Н, показывают, что текстурированная поверхность в стадии установившегося износа с минимальными показателями шероховатости (рис. 6, *a*, *c*), а нетекстурированная поверхность на стадии приработки и имеет высокую шероховатость (рис. 6, *b*, *d*).

Микротекстурирование сверла также выполнялось методом лазерной обработки, при которой на ленточке спирального сверла были созданы микротекстуры в виде круглых углублений (рис. 7). Плотность текстурированной поверхности составляла 10 и 20 %. После лазерной обработки инструменты были отшлифованы и очищены ультразвуком перед использованием их для экспериментов по сверлению.

Поверхностные осмотры сверла проводились каждые 10–15 отверстий в течение всего испытания. На рис. 7 показан пример полученных изображений во время испытания сверла без текстуры после сверления 0, 20 и 30 отверстий. Небольшое количество стружки присутствует после сверления 20 отверстий. После отказа при 30 отверстиях видно значительное количество стружки, что указывает на то, что механизмом отказа было нарастание титана

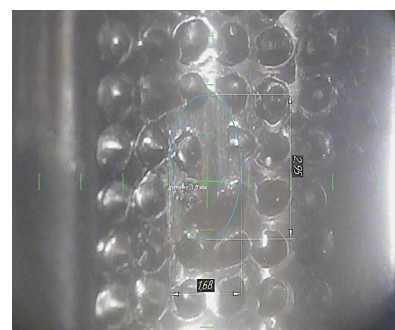


Рис. 4. Пятно контакта для текстуры — микроямки 120 мкм.

Fig. 4. Texture contact patch (120 μm micro-pits).

на краях сверла. Изображения, полученные при отказе после 68 отверстий для 10 % текстурированных и 20 % текстурированных сверл. Во всех случаях текстурированные сверла показали значительно меньшее нарастание титана, чем базовые сверла. Гораздо больше нарастания видны при отказе, что снова подтверждает механизм отказа в виде налипания стружки. Эти изображения показывают, что нарастание титана на краях сверла было доминирующим видом отказа сверл. Резкое увеличение пиковой температуры и крутящего момента во время сверления приводило к отказу инструмента при испытаниях. Большая площадь адгезии заготовки к сверлу напрямую связана с отказом инструмента.

Сверление считается самым сложным процессом обработки, который обычно выполняется на последних этапах изготовления механических компонентов. Для сверлильных инструментов скорость резания и передний угол изменяются вдоль режущей кромки от центра сверла. Скорость резания почти равна нулю на режущей кромке и максимальна в крайней точке режущей кромки (периферийная скорость резания). На режущей кромке материал испытывает большее пахотное действие под большим отрицательным передним углом, создавая большее трение. Контроль сил

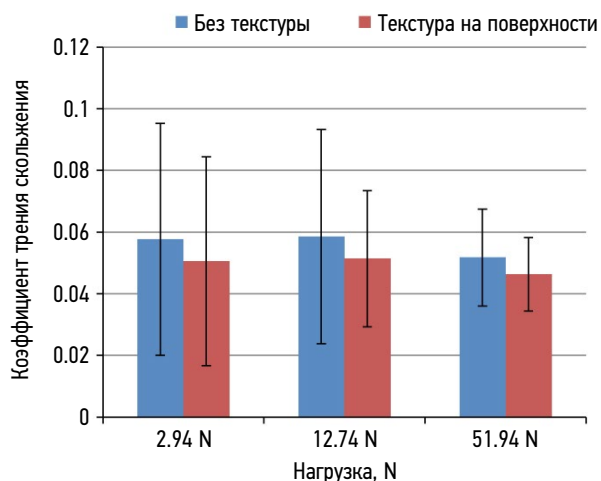


Рис. 5. Средние коэффициенты трения для текстурированных и гладких поверхностей.

Fig. 5. Average coefficients of friction for textured and smooth surfaces.

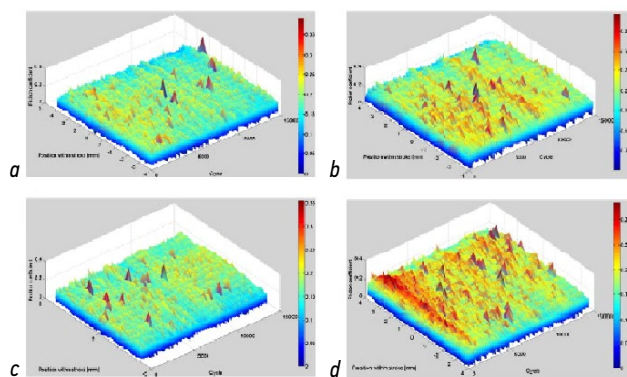


Рис. 6. Карты топографии поверхности при нагрузке 2,94 Н: а, с — текстурированная поверхность, испытание 1, 2; b, d — нетекстурированная поверхность, испытание 1, 2.

Fig. 6. Surface topography maps for a load of 2.94 N: a, c, textured surface, test 1, 2; b, d, non-textured surface, test 1, 2.

резания во время сверления очень затруднен, поскольку удаление материала происходит внутри отверстия. Обычно для достижения более высокой производительности сверление должно выполняться при более высоких условиях подачи и скорости, что увеличит скорость удаления материала. Сверление титановых сплавов при более высоких условиях резания всегда является сложной задачей для всех производственных отраслей из-за более высоких сил резания (оси и крутящего момента), которые будут вызывать вибрации на оси шпинделя, влияя на срок службы сверлильного инструмента и качество обработанной поверхности. Уменьшение трения скольжения, возникающего на стороне канавки (между инструментом и стружкой) и на стороне кромки (между инструментом и стенкой отверстия), позволяет эффективно контролировать чистую осевую нагрузку и крутящий момент при сверлении титанового сплава. На стороне канавки трение возникает из-за скользящего контакта стружки вдоль винтовой канавки.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, в работе продемонстрировано, что создание на поверхности микромасштабной текстуры является одним из методов снижения трения между двумя контактирующими телами. Средний коэффициент трения значительно отличался для текстурированных и гладких образцов. Трибоскопические карты коэффициента трения показали тенденцию к более низкому трению для текстурированных поверхностей, что свидетельствует об улучшенной смазке.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Pimenov D.Y. et al. Resource saving by optimization and machining environments for sustainable manufacturing: A review and future prospects // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2022. Vol. 166. P. 112660. DOI: 10.1016/j.rser.2022.112660 EDN: HSRNGI
2. Zhang K. et al. Effect of microscale texture on cutting performance of WC/Co-based TiAlN coated tools under different lubrication conditions // *Applied Surface Science*. 2015. Vol. 326. P. 107–118.
3. Machado A.R. et al. State of the art of tool texturing in machining // *Journal of Materials Processing Technology*. 2021. Vol. 293. P. 117096. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2021.117096 EDN: VOPMMO

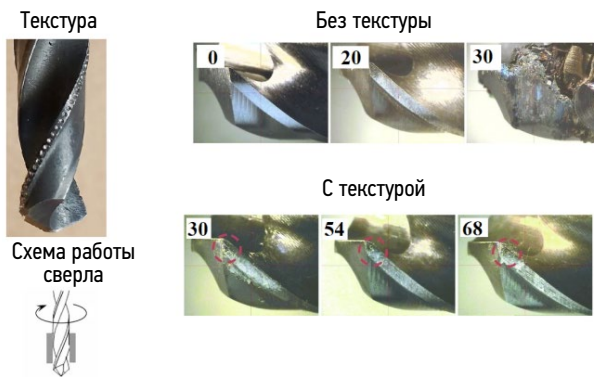


Рис. 7. Результаты испытаний при натурном эксперименте.  
Fig. 7. Natural experiment tests.

Установлено, что сверла без текстуры вышли из строя при 20–30 отверстиях в зависимости от условий испытаний. Сверла с 10 % текстурированной кромкой показали лучшие результаты: первое сверло вышло из строя при 45 отверстиях, а оставшиеся два сверла — при 70 и 78 отверстиях. Сверла с 20 % текстурированной кромкой вышли из строя при обработке 72, 30 и 71 отверстий.

## ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ИНФОРМАЦИЯ

**Вклад авторов.** Н.А. Астафьева — поиск публикаций по теме статьи, написание текста рукописи; создание изображений, А.Е. Балановский — редактирование текста рукописи, экспертная оценка, утверждение финальной версии. Все авторы одобрили рукопись (версию для публикации), а также согласились нести ответственность за все аспекты работы, гарантируя надлежащее рассмотрение и решение вопросов, связанных с точностью и добросовестностью любой её части.

**Источники финансирования.** Авторы заявляют об отсутствии внешнего финансирования при проведении исследования.

**Конфликт интересов.** Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией настоящей статьи.

**Генеративный искусственный интеллект.** При создании настоящей статьи технологии генеративного искусственного интеллекта не использовали.

## ADDITIONAL INFO

**Author contributions:** N.A. Astafieva: investigation, writing—original draft, visualization; A.E. Balanovskiy: writing—review & editing. All the authors approved the version of the manuscript to be published and agreed to be accountable for all aspects of the work, ensuring that questions related to the accuracy or integrity of any part of the work are appropriately investigated and resolved.

**Funding sources:** The study was not supported by any external sources.

**Disclosure of interests:** The authors have no explicit or potential conflicts of interests associated with the publication of this article.

**Generative AI:** No generative artificial intelligence technologies were used to prepare this article.

4. Ranjan P., Hiremath S.S. Role of textured tool in improving machining performance: A review // *Journal of Manufacturing Processes*. 2019. Vol. 43. P. 47–73. DOI: 10.1016/j.jmapro.2019.04.011 EDN: YXQDAM
5. Machado A.R. et al. State of the art of tool texturing in machining // *Journal of Materials Processing Technology*. 2021. Vol. 293. P. 117096. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2021.117096 EDN: VOPMMO
6. Wu Z. et al. Tribological characteristics and advanced processing methods of textured surfaces: a review // *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2021. Vol. 114. P. 1241–1277. DOI: 10.1007/s00170-021-06954-2 EDN: QJDPUY



7. Sugihara T., Kobayashi R., Enomoto T. Direct observations of tribological behavior in cutting with textured cutting tools // *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. 2021. Vol. 168. P. 103726. DOI: 10.1016/j.ijmachtools.2021.103726 EDN: NBIMSX
8. Özel T. et al. Structured and textured cutting tool surfaces for machining applications // *CIRP Annals*. 2021. Vol. 70. №. 2. P. 495–518. DOI: 10.1016/j.cirp.2021.05.006 EDN: TPKJCL
9. Sugihara T., Enomoto T. Performance of cutting tools with dimple textured surfaces: a comparative study of different texture patterns // *Precision Engineering*. 2017. Vol. 49. P. 52–60.
10. Волосова М.А. О выборе оптимального метода модификации поверхности режущего инструмента исходя из его служебного назначения // *Упрочняющие технологии и покрытия*. 2012. № 12. С. 12–16. EDN: PUUJFP
11. Верещака А.С., Верещака А.А. Функциональные покрытия для режущего инструмента / А.С. Верещака // *Упрочняющие технологии и покрытия*. 2010. № 26. С. 28–37. EDN: MQPADD
12. Fang Z., Obikawa T. Cooling performance of micro-texture at the tool flank face under high pressure jet coolant assistance // *Precision Engineering*. 2017. Vol. 49. P. 41–51.

13. Durairaj S. et al. An experimental study into the effect of micro-textures on the performance of cutting tool // *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2018. Vol. 98. P. 1011–1030. DOI: 10.1007/s00170-018-2309-y EDN: YIBMYX
14. Fatima A., Mativenga P.T. On the comparative cutting performance of nature-inspired structured cutting tool in dry cutting of AISI/SAE 4140 // *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*. 2017. Vol. 231, № 11. P. 1941–1948.
15. Григорьянц А.Г., Щиганов И.Н., Мисуров А.И. Технические процессы лазерной обработки. М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2006. 664 с.
16. Бровер Г.И., Щербаква Е.Е. Влияние текстурных эффектов на работоспособность лазернооблученного инструмента. Безопасность техногенных и природных систем. 2023. Т. 7. № 2. С. 102–112. DOI: 10.23947/2541-9129-2023-7-2-102-112 EDN: DQRENQ
17. Кремлева Л.В., Малыгин В.И., Снегирева К.К. Режимы лазерного упрочнения дереворежущего инструмента из легированных сталей // *Изв. высш. учебных заведений. Лесн. журн*. 2016. № 5. С. 157–166. DOI: 10.17238/issn0536-1036.2016.5.157 EDN: WNDDR

## REFERENCES

1. Pimenov DY, et al. Resource saving by optimization and machining environments for sustainable manufacturing: A review and future prospects. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2022;166:112660. DOI: 10.1016/j.rser.2022.112660 EDN: HSRNGI
2. Zhang K, et al. Effect of microscale texture on cutting performance of WC/Co-based TiAlN coated tools under different lubrication conditions. *Applied Surface Science*. 2015;326:107–118.
3. Machado AR, et al. State of the art of tool texturing in machining. *Journal of Materials Processing Technology*. 2021;293:117096. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2021.117096 EDN: VOPMMO
4. Ranjan P, Hiremath SS. Role of textured tool in improving machining performance: A review. *Journal of Manufacturing Processes*. 2019;43:47–73. DOI: 10.1016/j.jmapro.2019.04.011 EDN: YXQDAM
5. Machado AR, et al. State of the art of tool texturing in machining. *Journal of Materials Processing Technology*. 2021;293:117096. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2021.117096 EDN: VOPMMO
6. Wu Z, et al. Tribological characteristics and advanced processing methods of textured surfaces: a review. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2021;114:1241–1277. DOI: 10.1007/s00170-021-06954-2 EDN: QJDPYU
7. Sugihara T, Kobayashi R, Enomoto T. Direct observations of tribological behavior in cutting with textured cutting tools. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. 2021;168:103726. DOI: 10.1016/j.ijmachtools.2021.103726 EDN: NBIMSX
8. Özel T, et al. Structured and textured cutting tool surfaces for machining applications. *CIRP Annals*. 2021;70(2):495–518. DOI: 10.1016/j.cirp.2021.05.006 EDN: TPKJCL

9. Sugihara T, Enomoto T. Performance of cutting tools with dimple textured surfaces: a comparative study of different texture patterns. *Precision Engineering*. 2017;49:52–60.
10. Volosova MA. On choosing the optimal method for modifying the surface of a cutting tool based on its service purpose. *Hardening technologies and coatings*. 2012;12:12–16. (In Russ.) EDN: PUUJFP
11. Vereshchaka AS, Vereshchaka AA. Functional coatings for cutting tools. *Hardening technologies and coatings*. 2010;26:28–37. (In Russ.) EDN: MQPADD
12. Fang Z, Obikawa T. Cooling performance of micro-texture at the tool flank face under high pressure jet coolant assistance. *Precision Engineering*. 2017;49:41–51.
13. Durairaj S, et al. An experimental study into the effect of micro-textures on the performance of cutting tool. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2018;98:1011–1030. DOI: 10.1007/s00170-018-2309-y EDN: YIBMYX
14. Fatima A, Mativenga PT. On the comparative cutting performance of nature-inspired structured cutting tool in dry cutting of AISI/SAE 4140. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*. 2017;231(11):1941–1948.
15. Grigoryants AG, Shchiganov IN, Misyurov AI. *Technical processes of laser processing*. Moscow: Bauman Moscow State Technical University; 2006. (In Russ.)
16. Brover GI, Shcherbakova EE. The effect of texture effects on the operability of a laser-irradiated instrument. *Safety of man-made and natural systems*. 2023;7(2):102–112. (In Russ.) DOI: 10.23947/2541-9129-2023-7-2-102-112 EDN: DQRENQ
17. Kremleva LV, Malygin VI, Snegireva KK. Modes of laser hardening of wood-cutting tools from alloyed steels. *Izv. vyssh. uchebnykh zavedeniy. Lesn. zhurn*. 2016;5:157–166. (In Russ.) DOI: 10.17238/issn0536-1036.2016.5.157 EDN: WNDDR

## ОБ АВТОРАХ

\***Наталья Анатольевна Астафьева**, канд. техн. наук, доцент кафедры материаловедения, сварочных и аддитивных технологий, Иркутский национальный исследовательский технический университет; ORCID: 0000-0003-4957-9597; eLibrary SPIN: 9410-4167; e-mail: anstella@mail.ru

**Андрей Евгеньевич Балановский**, канд. техн. наук, доцент, заведующий кафедрой материаловедения, сварочных и аддитивных технологий, Иркутский национальный исследовательский технический университет; eLibrary SPIN: 7744-7353; e-mail: fuco.64@mail.ru

## AUTHORS' INFO

\***Natalia A. Astafeva**, Cand. Sci. (Engineering), Associate Professor of the Department of Materials Science, Welding and Additive Technologies, Irkutsk National Research Technical University; ORCID: 0000-0003-4957-9597; eLibrary SPIN: 9410-4167; e-mail: anstella@mail.ru

**Andrey E. Balanovsky**, Cand. Sci. (Engineering), Associate Professor, Head of the Department of Materials Science, Welding and Additive Technologies, Irkutsk National Research Technical University; eLibrary SPIN: 7744-7353; e-mail: fuco.64@mail.ru

\* Автор, ответственный за переписку / Corresponding author

Оригинальное исследование

УДК 621.793

DOI: [https://doi.org/10.52899/24141437\\_2025\\_02\\_237](https://doi.org/10.52899/24141437_2025_02_237)

EDN: LRDSXT

# Лазерно-индукционное термоупрочнение жаропрочных сталей

А.Д. Ахметов<sup>1</sup>, И.А. Цибульский<sup>1</sup>, А.О. Сидоренко<sup>1</sup>, В.В. Сомонов<sup>1,2</sup><sup>1</sup> Санкт-Петербургский государственный морской технический университет, Санкт-Петербург, Россия;<sup>2</sup> Национальный исследовательский университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия

## АННОТАЦИЯ

**Актуальность.** Эрозия лопаток паровых турбин в процессе эксплуатации — существенная проблема энергетической отрасли. В настоящее время существуют способы по борьбе с ней, которые, однако, имеют существенные недостатки. Предлагаемая в статье технология лазерно-индукционного термоупрочнения дает возможность, сочетая современные технологические инструменты, нивелировать явление эрозии и существенно увеличить ресурс лопаток турбин.

**Цель работы.** Исследование возможностей лазерного и индукционного источников нагрева, а именно, создание переменного глубокого упрочненного слоя в образцах из лопаточной стали, путем поверхностного термоупрочнения, а также исследования его свойств (структура и твердость, деформации образцов).

**Материалы и методы.** В настоящей статье представлены результаты экспериментальных исследований лазерно-индукционного термоупрочнения плоских образцов из жаропрочных сталей 15X11МФ, 20X13, ЭИ-961. Исследования выполнены в рамках работ по разработке технологии закалки поверхности лопаток паровых турбин из мартенситных сталей для защиты входных кромок от эрозии.

**Результаты.** Получена единая зона упрочнения на входной кромке и примыкающем участке спинки образцов без дефектов в виде микротрещин и несплошностей, без оплавления поверхности. Твердость в границах упрочненного слоя со стороны входной кромки — не менее 400 HV0.5. При этом глубина упрочненного слоя в области входной кромки составляет не менее 5 мм, а на примыкающем участке спинки лопатки — не менее 2 мм. Максимальная деформация образца после термоупрочнения не превышает 1,2 мм.

**Заключение.** По результатам экспериментов лазерно-индукционного термоупрочнения плоских образцов из жаропрочных сталей 15X11МФ, 20X13, ЭИ-961 можно заключить, что данный вид обработки является перспективным для замены традиционных способов термоупрочнения поверхности изделий, выполненных из этих материалов, в борьбе против эрозии.

**Ключевые слова:** лазерно-индукционное термоупрочнение, жаропрочные стали, механические свойства, повышение твердости, закалка, деформации, эрозия.

## Как цитировать

Ахметов А.Д., Цибульский И.А., Сидоренко А.О., Сомонов В.В. Лазерно-индукционное термоупрочнение жаропрочных сталей // Труды Санкт-Петербургского государственного морского технического университета. 2025. Т. 4, № 2. С. 237–244. DOI: 10.52899/24141437\_2025\_02\_237 EDN: LRDSXT

Original study article

DOI: [https://doi.org/10.52899/24141437\\_2025\\_02\\_237](https://doi.org/10.52899/24141437_2025_02_237)

EDN: LRDSXT

# Laser and Induction Hardening of Refractory Steels

Aleksander D. Akhmetov<sup>1</sup>, Igor A. Tsibulsky<sup>1</sup>, Anton O. Sidorenko<sup>1</sup>, Vladislav V. Somonov<sup>1, 2</sup><sup>1</sup> Saint Petersburg State Marine Technical University, Saint Petersburg, Russia;<sup>2</sup> National Research University ITMO, Saint Petersburg, Russia

## ABSTRACT

**BACKGROUND:** Steam turbine blade erosion during operation is a serious problem in the energy industry. Today, there are methods to prevent it; however, they have significant limitations. The laser and induction hardening technology proposed in the paper allows to mitigate erosion and significantly increase the service life of turbine blades by combining state-of-the-art process tools.

**AIM:** To study the capabilities of laser and induction heat sources, i.e. to create a variable deep-hardened layer in blade steel test pieces by surface hardening, and its properties (structure and hardness, test piece deformations).

**MATERIALS AND METHODS:** This paper presents the experimental studies of laser and induction hardening of flat test pieces made of refractory steels 15H11MF, AISI 420, and EI961. The study was conducted during the development of a hardening technology to treat the surface of steam turbine blades made of martensitic steels to protect their leading edges from erosion.

**RESULTS:** We obtained a single hardening zone on the leading edge and the adjacent section on the back of the test pieces with no defects, i.e. microcracking, discontinuities, and surface glazing. Hardness within the boundaries of the hardened layer on the leading edge side is at least 400 HV0.5. In this case, the hardened layer depth in the area of the leading edge is at least 5 mm and at least 2 mm in the adjacent section of the blade back. The maximum test piece deformation after strengthening is 1.2 mm.

**CONCLUSION:** Experiments on laser and induction hardening of flat test pieces made of refractory steels 15H11MF, AISI 420, EI961 show that this treatment is a promising method to replace conventional surface hardening of products made from these materials to protect them from erosion.

**Keywords:** laser and induction hardening; refractory steels; mechanical properties; hardening; quenching; deformation; erosion.

## To cite this article

Akhmetov AD, Tsibulsky IA, Sidorenko AO, Somonov VV. Laser and Induction Hardening of Refractory Steels. *Transactions of the Saint Petersburg State Marine Technical University*. 2025;4(2):237–244. DOI: 10.52899/24141437\_2025\_02\_237 EDN: LRDSXT

Submitted: 04.04.2025

Accepted: 21.04.2025

Published online: 26.06.2025

## ВВЕДЕНИЕ

Лопатка турбины представляет собой металлическую пластину, предназначенную для работы с потоками расширенного газа в турбинной установке. Лопатки преобразуют линейное движение пара высокой температуры и высокого давления, движущегося в сторону снижения давления, во вращательное движение вала турбины.

Детали паровых турбин, работающие во влажном паре, подвергаются непрерывному воздействию капель или струй жидкости, из-за чего может возникать капельная эрозия [1–4]. Капли воды могут ударяться о вращающиеся лопатки последней ступени преимущественно с выпуклой стороны (спинки) лопатки с относительной скоростью до нескольких сотен метров в секунду. Высокая энергия удара капель, особенно на больших лопатках, может привести к повреждению материала, в первую очередь на входных кромках вблизи кончиков лопастей [5, 6]. Для повышения сопротивления эрозии лопаток с низким давлением под воздействием капель воды существует много технологий [7, 8], самая распространенная из них — использование стеллитовых пластинок, которые припаивают к входной кромке. Данная технология имеет ряд недостатков: различие коэффициента линейного расширения напайной пластины и основного металла рабочей лопатки; разброс твердости поверхностного слоя стеллитовых пластин (различие может достигнуть HV 100); изменение аэродинамической формы профиля рабочей лопатки; возможность отрыва стеллитовых пластин целиком; возможный эрозионный износ поверхностей лопаток ниже стеллитовых напайек и в промежуточных зонах между напайными пластинами; снижение усталостной прочности рабочей лопатки. При нарушении технологии припайки стеллитовых пластин могут появиться локальные прижёги основного материала лопатки, что приводит к его охрупчиванию и повышенной опасности возникновения трещин в месте прижёга. Кроме того, место стыка стеллитовых пластин является своеобразным концентратором напряжений. При эксплуатации турбин в нерасчётных режимах (с малыми объёмными расходами рабочего пара в конденсатор, на ухудшенном вакууме) в них могут появиться трещины, способные в дальнейшем привести к разрушению рабочих лопаток [9]. Там же приведены данные по опыту эксплуатации в 1985–2008 гг. на филиале «Сургутская ГРЭС-2» ОАО «ОГК-4» 6 паровых турбин мощностью по 800 МВт, который свидетельствует о том,

что ко второму капитальному ремонту (при наработке 75–95 тыс. ч и числе пусков 245–308) рабочими лопатками «утрачено» до 50–90 % стеллитовых пластин).

Современным методом упрочнения паровых лопаток является лазерная закалка [10–12]. При лазерной закалке осуществляется нагрев за счет энергии излучения лазера и естественное охлаждение с отводом тепла от нагретой области в деталь за счет классического механизма теплопроводности и в окружающее пространство путем теплового излучения. Данный способ перспективнее, т. к. стабильнее, проще и обеспечивает хорошие результаты в плане повышения стойкости поверхности лопаток к эрозии [13, 14]. В данной работе представлены результаты лазерно-индукционного термоупрочнения на образцах с постоянной и переменной кромками из лопаточной стали 15X11МФ-Ш, 20X13 и ЗИ-961.

## МЕТОДЫ

В качестве источника лазерного излучения использован волоконный лазер ЛС-15 с максимальной выходной мощностью 15 кВт. Внешний вид источника лазерного излучения представлен на рис. 1. Лазерное излучение фокусировалось сварочной головкой ND65 фирмы WSX, оснащенной гальванометром, позволяющим осуществлять поперечные колебания. В качестве второго источника нагрева использовали сверхвысокочастотную (СВЧ) установку СВЧ-6АВ максимальной мощностью 6 кВт. На рис. 1 представлена схема компонентов стенда, на котором были проведены эксперименты по термообработке.

Для экспериментальных исследований лазерно-индукционного термоупрочнения использованы плоские образцы постоянного сечения размерами 460×80×16,5 мм и переменного сечения размерами 450×60/70×16,8 мм из жаропрочных сталей 15X11МФ, 20X13, ЗИ-961 (рис. 2). Химический состав сталей представлен в табл. 1. Целью исследований было получение единой зоны упрочнения на входной кромке и примыкающем участке спинки образцов (рис. 2, с) без дефектов в виде микротрещин и несплошностей, без оплавления поверхности, оценка твердости в границах упрочненного слоя, а также глубины упрочненного слоя в области входной кромки и на примыкающем участке спинки.

Экспериментальные исследования лазерного термоупрочнения осуществляли способом непрерывной обработки зоны упрочнения на входной кромке индуктором

Таблица 1. Химический состав в % материала

Table 1. Chemical composition in % material

	C	Si	Mn	Ni	S	P	Cr	Mo	V	Cu	W	V
15X11МФ	0,12–0,19	До 0,5	До 0,7	До 0,6	До 0,025	До 0,03	10–11,5	0,6–0,8	0,25–0,4	До 0,3	–	–
20X13	0,16–0,25	До 0,6	До 0,6	До 0,6	До 0,025	До 0,03	12–14	–	–	–	–	–
ЗИ-961	0,1–0,16	До 0,6	До 0,6	1,5–1,8	До 0,03	До 0,03	10,5–12	0,35–0,5	–	–	1,6–2	0,18–0,3

и на примыкающем участке спинки лопатки лазерным излучением, при сканировании лазерного излучения в поперечном направлении, за один проход (рис. 3). В ходе обработки осуществлялось непрерывное перемещение образца относительно стационарных источников нагрева. Для фиксации температуры в зоне нагрева использовали инфракрасную камеру. После лазерной заковки проводилась зачистка обработанных поверхностей абразивной бумагой.

После проведения лазерной термообработки необходимо изготовить шлифы для исследования макро- и микроструктуры образцов на наличие недопустимых дефектов структуры, измерения глубины закаленной зоны, а также измерения твердости. Для изготовления шлифов использовались: электроэрозионный отрезной станок ProTech DK-7755, модульный пресс для горячей запрессовки образцов ATM OPAL X-PRESS, шлифовально-полировальный станок ATM SAPHIR 250 ECO.

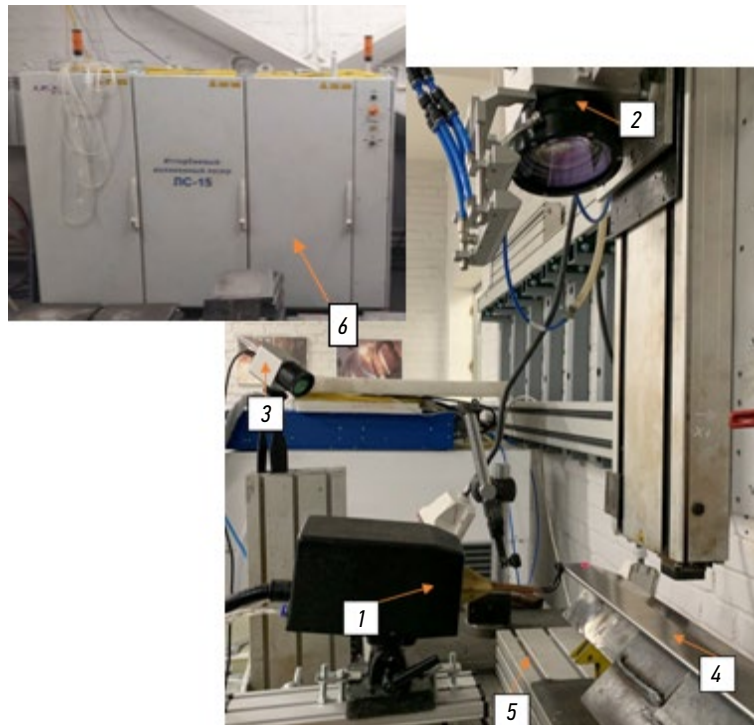


Рис. 1. Стенд для лазерно-индукционного термоупрочнения: 1 — индуктор СВЧ-6АВ; 2 — лазерная головка для сварки с гальванометром ND65; 3 — инфракрасная камера Optris PI08МТК; 4 — плоский образец из жаропрочной стали для термоупрочнения, закрепленный на сварочных магнитных упорах; 5 — 2-координатный подвижный стол; 6 — волоконный лазер ЛС-15.

Fig. 1. Laser and induction hardening bench: 1, SVCh-6AV induction coil; 2, laser welding head with ND65 galvanometer; 3, Optris PI08MTK infrared camera; 4, flat hardening test piece made of refractory steel fixed on magnetic welding clamp; 5, 2-axis moving table; 6, LS-15 fiber laser.

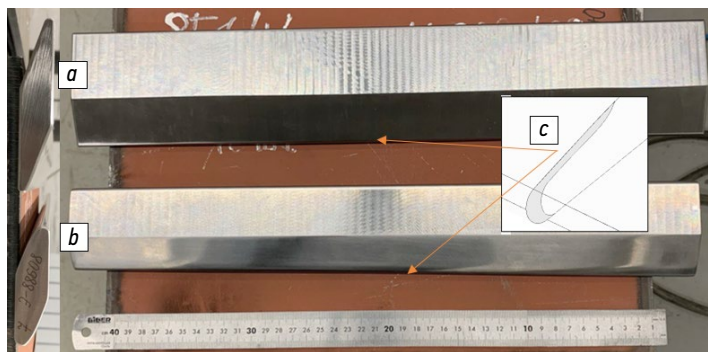


Рис. 2. Плоские образцы: *a* — постоянного сечения размерами 460×80×16,5 мм и *b* — переменного сечения размерами 450×60/70×16,8 мм из жаропрочных сталей 15Х11МФ, 20Х13, ЭИ-961; *c* — местоположение и геометрия единой зоны упрочнения.

Fig. 2. Flat test pieces: *a*, with uniform cross-section (460×80×16.5 mm); *b*, variable cross-section (450×60/70×16.8 mm), all made of refractory steels 15H11MF, AISI 420, EI961; *c*, location and dimensions of a single hardening zone.

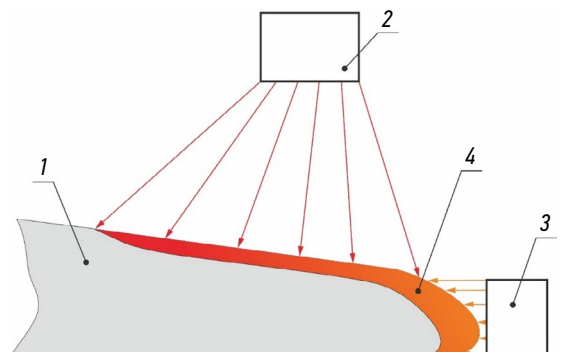


Рис. 3. 1 — обрабатываемый плоский образец; 2 — лазерный источник нагрева; 3 — индукционный источник нагрева; 4 — зона совместного действия двух источников нагрева.

Fig. 3. 1, processed flat test piece; 2, laser heat source; 3, induction heat source; 4, joint action zone of two heat sources.

Для выявления структуры проводили химическое травление реактивом Каллинга (20 мл H<sub>2</sub>O, 20 мл HCl, 4 г CuCl<sub>2</sub>) в течение 2–3 мин. Микроструктура исследовалась на оптическом микроскопе Leica DMi8 с использованием ПО Axalut. Измерения твердости и микротвердости производились на твердомере Future-Tech FM-310 с использованием ПО Thixomet Pro, с увеличением от 10х до 50х.

## РЕЗУЛЬТАТЫ

В результате экспериментов термообработки плоских образцов постоянного сечения на коротких участках длиной 50 мм было установлено, что необходимая глубина и профиль закалки (рис. 4) достигаются при максимальном нагреве образца без принудительного последующего охлаждения, на низких скоростях (до 1 мм/с), с большим пятном нагрева и наибольшей мощностью (в пределах 3 кВт), при которых не происходит оплавления поверхности.

Микроструктура упрочненного слоя образцов — однородная, мелкозернистая, оплавления в поверхностной зоне не выявлено. В микроструктуре переходной зоны окисления границ зерен, роста зерна, дефектов в виде микротрещин, несплошностей не обнаружено.

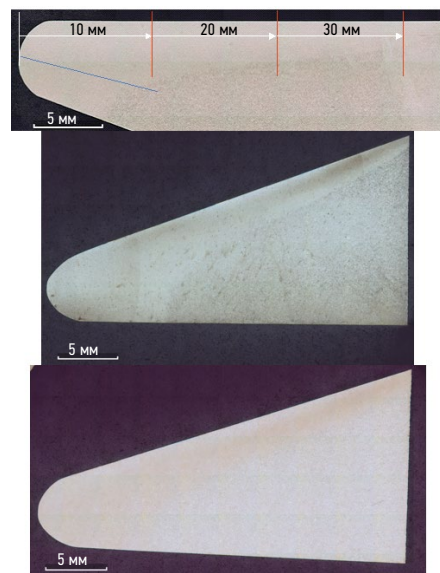


Рис. 4. Макрошлифы упрочненной зоны входной кромки плоских образцов постоянного сечения: *верх* — 15Х11МФ (красным и синим цветами показаны местоположения линий, по которым измеряли твердость на всех образцах); *середина* — 20Х13; *низ* — ЭИ-961.

Fig. 4. Large sections of the hardened zone on the leading edge of flat test pieces with uniform cross-section: *top*, 15H11MF (location of hardness measurement lines on all test pieces are shown in red and blue); *middle*, AISI 420; *bottom*, EI961.

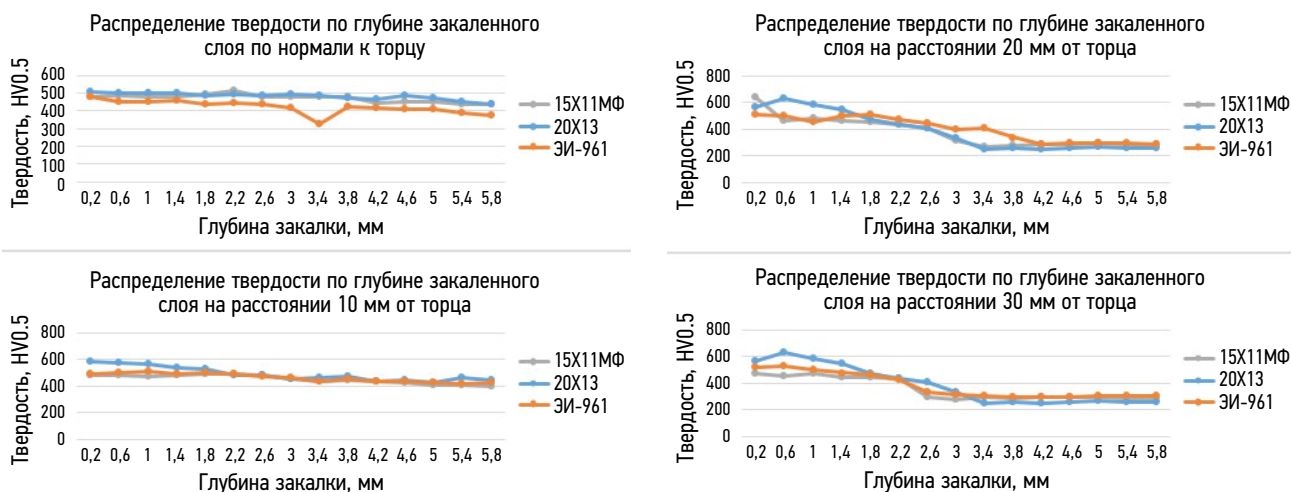


Рис. 5. Графики распределения твердости на различных участках закаленного слоя.

Fig. 5. Hardness distribution graphs for different areas of the hardened layer.

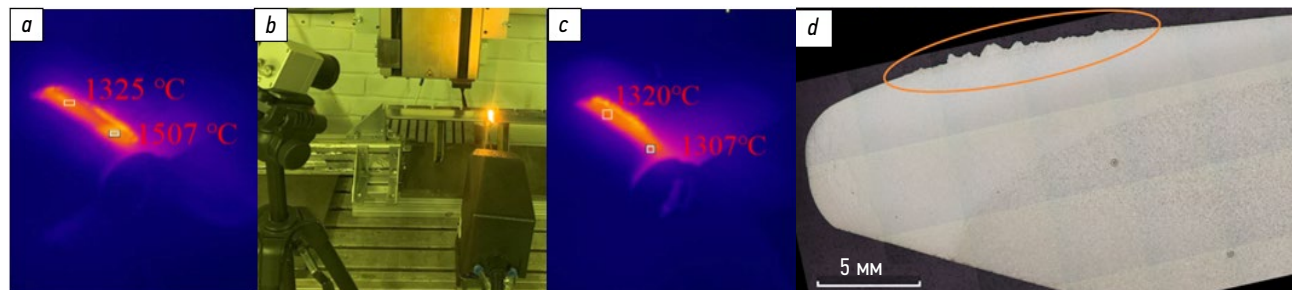


Рис. 6. Процесс термоупрочнения (b) с фиксированием температуры в области нагрева с постоянной (a) и изменяемой (c) мощностью лазера по амплитуде сканирования; макрошлиф упрочненной зоны входной кромки (d) плоского образца постоянного сечения 15Х11МФ с характерной зоной оплавления в общей зоне действия двух источников нагрева.

Fig. 6. Hardening process (b) with temperature recording in the heating area with constant (a) and variable (c) laser power by scanning amplitude; large section of the hardened zone on the leading edge (d) of a flat 15H11MF test piece with uniform cross-section and a typical glazing zone in the joint action area of two heat sources.

Для полученных образцов была измерена твердость закаленной зоны (по линиям, указанным на рис. 4, *верх*), результаты представлены на графиках (рис. 5).

Глубина упрочненного слоя в области входной кромки составляет не менее 5 мм, а на примыкающем участке спинки лопатки — не менее 2 мм. Получена твердость в границах упрочненного слоя не менее 400 HVO.5.

С помощью инфракрасной камеры было установлено, что оплавление появляется, когда температура нагрева на поверхности превышает 1400 °С. Наибольшая вероятность оплавления локализуется в зоне совместного действия источников нагрева на спинке, на расстоянии 10–15 мм от входной кромки (рис. 6, *d*).

При переходе на образцы с переменным сечением для обеспечения желаемой глубины упрочнения входной кромки необходимо было увеличить мощность индуктора. При этом на постоянной мощности лазера по амплитуде сканирования излучения оплавление поверхности всегда присутствовало, т.к. в общей зоне действия двух источников нагрева температура лежала выше границы 1400 °С (рис. 6, *a*). Для его устранения была изменена мощность лазера по амплитуде сканирования путем разбиения на два участка с разной мощностью на каждом. В зоне

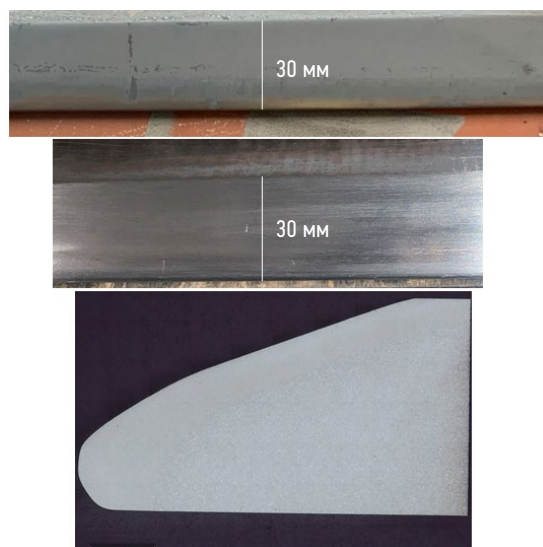


Рис. 7. Внешний вид упрочненной зоны поверхности переменного сечения образца 15X11МФ: *верх* — после закалки; *середина* — после механической зачистки абразивной бумагой; *низ* — макрошлифы упрочненной зоны входной кромки.

Fig. 7. View of the hardened zone of the variable cross-section surface of the 15H11MF test piece: *top*, after hardening; *middle*, after grinding with abrasive paper; *bottom*, large sections of the hardened zone on the leading edge.

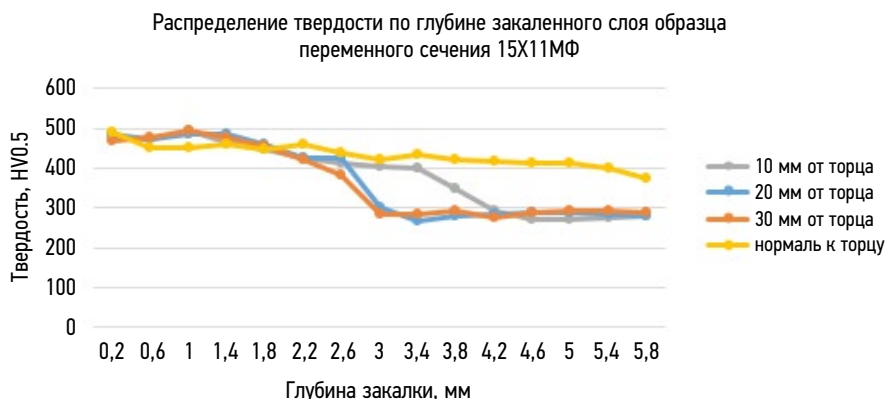


Рис. 8. График распределения твердости на различных участках закаленного слоя образца переменного сечения 15X11МФ.  
Fig. 8. Hardness distribution graph for different areas of the hardened layer of the 15H11MF test piece with variable cross-section.

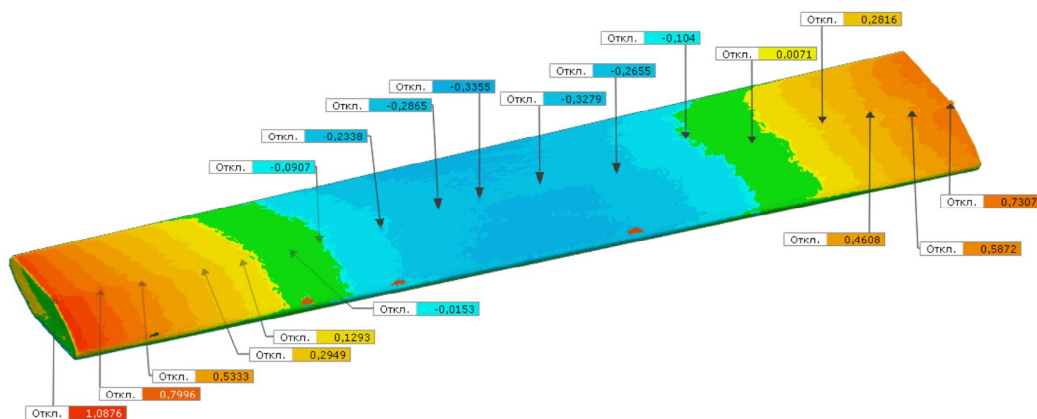


Рис. 9. Визуализация деформации пластины после термоупрочнения. Указаны значения отклонений от первоначального состояния образца до обработки в миллиметрах.

Fig. 9. Visualization of plate deformation after hardening. Deviations from the original state of the test piece before processing are indicated in millimeters.

совместного действия источников нагрева мощность лазера была снижена на 40 %. В результате этих мер температура на поверхности во время термообработки не превышала обозначенную границу появления оплавления (рис. 6, с).

После подбора оптимального режима упрочнения на коротких участках был обработан плоский образец 15X11МФ переменного сечения на всю длину (рис. 7). После зачистки образца абразивной бумагой на нем не наблюдались дефекты в виде микротрещин и несплошностей, а также оплавления поверхности.

Для макрошлифа, представленного на рис. 7, была измерена твердость, результаты которой показаны на графике (рис. 8). Полученные значения аналогичны результатам, полученным для плоских образцов постоянного сечения, по глубине упрочненного слоя и значениям твердости.

После упрочнения образец был отсканирован с помощью 3D-сканера для контроля деформации пластины. Результаты изменения геометрии образца представлены на рис. 9. Максимальное отклонение после термообработки от первоначального состояния составило 1,09 мм.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По результатам экспериментов лазерно-индукционного термоупрочнения плоских образцов из жаропрочных сталей 15X11МФ, 20X13, ЭИ-961 можно заключить, что данный вид обработки является перспективным для замены традиционных способов термоупрочнения поверхности изделий, выполненных из этих материалов, в борьбе против эрозии.

Получена единая зона упрочнения на входной кромке и примыкающем участке спинки образцов без дефектов в виде микротрещин и несплошностей, без оплавления поверхности.

Твердость в границах упрочненного слоя со стороны входной кромки — не менее 400 HV0.5. При этом глубина упрочненного слоя в области входной кромки составляет не менее 5 мм, а на примыкающем участке спинки лопатки — не менее 2 мм.

Максимальная деформация образца после термоупрочнения не превышает 1,2 мм.

## ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ИНФОРМАЦИЯ

**Вклад авторов.** А.Д. Ахметов — написание текста рукописи. И.А. Цибульский — экспертная оценка, утверждение финальной версии. А.О. Сидоренко, В.В. Сомонов — создание изображений, редактирование текста. **Источники финансирования.** Авторы заявляют об отсутствии внешнего финансирования при проведении исследования.

**Конфликт интересов.** Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией настоящей статьи.

**Генеративный искусственный интеллект.** При создании настоящей статьи технологии генеративного искусственного интеллекта не использовались.

## ADDITIONAL INFO

**Author contributions:** A.D. Akhmetov: writing—original draft; I.A. Tsybul'skiy: writing—review & editing; A.O. Sidorenko, V.V. Somonov: visualization, writing—review & editing.

**Funding sources:** The study was not supported by any external sources.

**Disclosure of interests:** The authors have no explicit or potential conflicts of interests associated with the publication of this article.

**Generative AI:** No generative artificial intelligence technologies were used to prepare this article.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Cook S.S. Erosion by Water-Hammer // Proceedings of The Royal Society: A. Mathematical, Physical and Engineering Sciences. 1928. Vol. 119, № 783. P. 481–488. doi: 10.1098/rspa.1928.0107
2. Gardner G.C. Events leading to erosion in the steam turbines // Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers. 1963. Vol. 178, № 1. P. 593–601.
3. Heymann F., Thiruvengadam A. Characterization and Determination of Erosion Resistance ASTM STP 474. In: A Symposium Presented at the Seventy-second Annual Meeting. Atlantic City: American Society for Testing and Materials, 1969.
4. Heymann F. J. Liquid impingement erosion // ASM Handbook, ASM International Material Park, OH. 1992. Vol. 18. P. 221–232.
5. Schuerhoff J., Ghicov A., Sattler K. Advanced water droplet erosion protection for modern low pressure steam turbine steel blades. In: Proceedings of ASME Turbo Expo 2015: Turbine Technical Conference and Exposition. 2015. Vol. 8. doi: 10.1115/GT2015-43140
6. Yuwei Wei, Yongjun Li, Jiafeng Lai, et al. Analysis on corrosion fatigue cracking mechanism of 17-4PH blade of low-pressure rotor of steam turbine // Engineering Failure Analysis. 2020. Vol. 118. doi: 10.1016/j.engfailanal.2020.104925 EDN: YUPAWJ
7. Тополянский П. А. Повышение эрозионной стойкости входных кромок лопаток ступеней низкого давления паровых турбин (обзор). В кн.: Технологии ремонта, восстановления, упрочнения и обновления машин, механизмов, оборудования и металлоконструкций. Материалы 4-й Всероссийской практической конференции 16–18 апреля 2002 г. Санкт-Петербург: СПбГТУ, 2002. С. 30–49. EDN: XCWSXB
8. Sabaa Sattar, Yaser Alaiwi, Nabaa Sattar Radhi, et al. Corrosion reduction in steam turbine blades using nano-composite coating // Journal of King Saud University. 2023. Vol. 35. № 8. doi: 10.1016/j.jksus.2023.102861
9. Неуймин В. М. О стойкости стеллитовой защиты рабочих лопаток последних ступеней паровых турбин // Энергосбережение и водоподготовка. 2010. № 2 (64). С. 52–54. EDN: MVKDGH



10. Сомонов В.В. Цибульский И.А. Эффективность использования волоконных лазеров для лазерной закалки изделий в промышленности // *Металлообработка*. 2014. № 1 (79). С. 9–12. EDN: SITSQF
11. Somonov V.V. Tsibulskiy I.A., Mendagaliyev R., Akhmetov A. Investigation of the Technological Possibility of Laser Hardening of Stainless Steel 14Cr17Ni2 to a Deep Depth of the Surface // *Metals*. 2022. Vol. 12. № 1. P. 5. doi: 10.3390/met12010005 EDN: LAUUMX
12. Kennedy E. Byrne G., Collins D.N. A review of the use of high power diode lasers in surface hardening // *Journal of Materials Processing Technology*.

2004. Vol. 155–156. P. 1855–1860. doi: 10.1016/j.jmatprotec.2004.04.276 EDN: KLQSLX
13. Jianhua Yao, Qunli Zhang, Fanzhi Kong, Qingming Ding. Laser hardening techniques on steam turbine blade and application // *Physics Procedia*. 2010. Vol. 5. P. 399–406. doi: 10.1016/j.phpro.2010.08.161
14. Pavan A.H.V., Somnath Nandi, Amit Kumar, Swamy M. Effect of laser hardening and post hardening shot peening on residual stress evolution in X5CrNiCuNb16-4 steel for steam turbine blade applications // *Procedia Structural Integrity*. 2024. Vol. 60. P. 277–285. doi: 10.1016/j.prostr.2024.05.049

## REFERENCES

1. Cook SS. Erosion by Water-Hammer. *Proceedings of The Royal Society: A. Mathematical, Physical and Engineering Sciences*. 1928;119(783):481–488. doi: 10.1098/rspa.1928.0107
2. Gardner GC. Events leading to erosion in the steam turbines. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers*. 1963;178(1):593–601.
3. Heymann F, Thiruvengadam A. *Characterization and Determination of Erosion Resistance ASTM STP 474*. In: *A Symposium Presented at the Seventy-second Annual Meeting*. Atlantic City: American Society for Testing and Materials, 1969.
4. Heymann F.J. *Liquid impingement erosion*. ASM Handbook. Ohio: ASM International Material Park; 1992;18:221–232.
5. Schuerhoff J, Ghicov A, Sattler K. Advanced water droplet erosion protection for modern low pressure steam turbine steel blades. In: *Proceedings of ASME Turbo Expo 2015: Turbine Technical Conference and Exposition*. 2015;8. doi: 10.1115/GT2015-43140
6. Yuwei Wei, Yongjun Li, Jiafeng Lai, et al. Analysis on corrosion fatigue cracking mechanism of 17-4PH blade of low-pressure rotor of steam turbine. *Engineering Failure Analysis*. 2020;118. doi: 10.1016/j.engfailanal.2020.104925 EDN: YUPAWJ
7. Topolianskii PA. Increase of erosion resistance of inlet edges of low-pressure blades of steam turbine stages (review). In: *Technologies of repair, restoration, hardening and renewal of machines, mechanisms, equipment and metal structures. Materials of the 4th All-Russian Practical Conference April 16–18, 2002*. St. Petersburg: SPbSTU; 2002:30–49. (In Russ.) EDN: XCWSXB
8. Sabaa Sattar, Yaser Alaiwi, Naba Sattar Radhi, et al. Corrosion reduction in steam turbine blades using nano-composite coating. *Journal of King Saud University*. 2023;35(8). doi: 10.1016/j.jksus.2023.102861
9. Neumin VM. About durability of stellite protection of working blades of the last stages of steam turbines. *Energy saving and water treatment*. 2010;2(64):52–54. EDN: MVKDGH
10. Somonov VV, Tsibulskiy IA. Efficiency of using fiber lasers for laser hardening of products in industry. *Metalloobrabotka*. 2014;1(79):9–12. (In Russ.) EDN: SITSQF
11. Somonov VV, Tsibulskiy IA, Mendagaliyev R, et al. Investigation of the Technological Possibility of Laser Hardening of Stainless Steel 14Cr17Ni2 to a Deep Depth of the Surface. *Metals*. 2022;12(1):5. doi: 10.3390/met12010005 EDN: LAUUMX
12. Kennedy E, Byrne G, Collins DN. A review of the use of high power diode lasers in surface hardening. *Journal of Materials Processing Technology*. 2004;155–156:1855–1860. doi: 10.1016/j.jmatprotec.2004.04.276 EDN: KLQSLX
13. Jianhua Yao, Qunli Zhang, Fanzhi Kong, et al. Laser hardening techniques on steam turbine blade and application. *Physics Procedia*. 2010;5:399–406. doi: 10.1016/j.phpro.2010.08.161
14. Pavan AHV, Somnath Nandi, Amit Kumar, et al. Effect of laser hardening and post hardening shot peening on residual stress evolution in X5CrNiCuNb16-4 steel for steam turbine blade applications. *Procedia Structural Integrity*. 2024;60:277–285. doi: 10.1016/j.prostr.2024.05.049

## ОБ АВТОРАХ

\***Александр Дмитриевич Ахметов**, ведущий инженер технологического отдела, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет; адрес: 190121, Россия, Санкт-Петербург, Лотманская ул., д. 3; ORCID: 0000-0002-4472-2115; eLibrary SPIN: 3756-9277; e-mail: a.akhmetov@ltc.ru

**Игорь Александрович Цибульский**, ведущий научный сотрудник, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет; eLibrary SPIN: 3110-5791; e-mail: igor@ltc.ru

**Антон Олегович Сидоренко**, инженер отдела тестирования материалов, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет; eLibrary SPIN: 8946-8560; e-mail: anton-sidorenko10@mail.ru

**Владислав Валерьевич Сомонов**, ведущий инженер, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет, Национальный исследовательский университет ИТМО; eLibrary SPIN: 1648-4357; e-mail: vlad@ltc.ru

## AUTHORS' INFO

\***Aleksander D. Akhmetov**, Leading Engineer of the Technological Department, Saint Petersburg State Marine Technical University; address: 3, Lotmanskaya St., Saint Petersburg, 190121, Russia; ORCID: 0000-0002-4472-2115; eLibrary SPIN: 3756-9277; e-mail: a.akhmetov@ltc.ru

**Igor A. Tsibulsky**, Leading Research Associate, Saint Petersburg State Marine Technical University; eLibrary SPIN: 3110-5791; e-mail: igor@ltc.ru

**Anton O. Sidorenko**, Engineer Materials Testing Department, Saint Petersburg State Marine Technical University; eLibrary SPIN: 8946-8560; e-mail: anton-sidorenko10@mail.ru

**Vladislav V. Somonov**, Lead Engineer, Saint Petersburg State Marine Technical University, National Research University ITMO; eLibrary SPIN: 1648-4357; e-mail: vlad@ltc.ru

\* Автор, ответственный за переписку / Corresponding author

Оригинальное исследование

УДК 621.791.725

DOI: [https://doi.org/10.52899/24141437\\_2025\\_02\\_245](https://doi.org/10.52899/24141437_2025_02_245)

EDN: XQEDVC

# Термическая обработка разнородных лазерных сварных соединений Al-Cu-Li сплавов с существенной разницей в соотношении Li/Cu

И.Е. Витошкин<sup>1</sup>, А.Г. Маликов<sup>1</sup>, А.П. Завьялов<sup>2</sup>, Н.Ю. Бурхинова<sup>1</sup>, Е.В. Карпов<sup>3</sup><sup>1</sup> Институт теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича СО РАН, Новосибирск, Россия;<sup>2</sup> Центр коллективного пользования «Сибирский кольцевой источник фотонов» Института катализа СО РАН, Новосибирск, Россия;<sup>3</sup> Институт гидродинамики им. М.А. Лаврентьева СО РАН, Новосибирск, Россия

## АННОТАЦИЯ

**Актуальность.** Соединение разнородных материалов — сложная, но вместе с тем важная задача для промышленности, поскольку применение разнородных материалов в сложных конструкциях неизбежно. В данной статье приведены результаты работы по оптимизации микроструктуры разнородного лазерного сварного соединения Al-Cu-Li сплавов с различным соотношением Cu/Li.

**Цель работы.** Целью работы было изучение структуры лазерного сварного соединения между разнородными Al-Cu-Li сплавами, а также разработка методов улучшения этой структуре на основе термической обработки.

**Материалы и методы исследования.** В работе применялись методы растровой электронной микроскопии, дифракции синхротронного излучения, а также испытания на растяжение. Применение дифракции СИ позволило установить присутствие литий-содержащих фаз, объёмная доля и рассеивающая способность которых не позволяет в полной мере обнаружить их, используя менее яркие источники излучения.

**Результаты.** Показано, что сварка приводит к формированию неблагоприятной микроструктуры с точки зрения механических свойств — дендритные зёрна алюминия, окруженные эвтектической сеткой из интерметаллидных соединений  $T_1Al_2CuLi$ ,  $T_2Al_6CuLi_3$  и  $T_3Al_5CuLi_3$ . В таком состоянии сварной шов обладал низкими механическими свойствами: предел прочности  $\sigma_B$  составлял 252 МПа, предел текучести  $\sigma_{0,2}$  184 МПа и относительное удлинение  $\delta$  2,9 %. Закалка при 530 °C позволила практически полностью растворить эвтектическую сетку, что было подтверждено растровой электронной микроскопией. Искусственное старение при 170 °C в течении 16 часов позволило добиться рекристаллизации упрочняющих фаз, что привело к увеличению предела прочности сварного соединения  $\sigma_B$  до 344 МПа, предела текучести  $\sigma_{0,2}$  до 230 МПа и относительного удлинения  $\delta$  до 4,8 %.

**Заключение.** В результате работы была установлена структура лазерных сварных соединений разнородных Al-Cu-Li сплавов, а также показано, что эту структуру можно улучшить при помощи термической обработки, таким образом достигая значительного прироста как прочностных свойств соединения, так и его пластичности.

**Ключевые слова:** алюминиевые сплавы; разнородная сварка; лазерная сварка; термическая обработка; дифракция синхротронного излучения; сканирующая электронная микроскопия; испытания на растяжение.

## Как цитировать

Витошкин И.Е., Маликов А.Г., Завьялов А.П., Бурхинова Н.Ю., Карпов Е.В. Термическая обработка разнородных лазерных сварных соединений Al-Cu-Li сплавов с существенной разницей в соотношении Li/Cu // Труды Санкт-Петербургского государственного морского технического университета. 2025. Т. 4, № 2. С. 245–252. DOI: [10.52899/24141437\\_2025\\_02\\_245](https://doi.org/10.52899/24141437_2025_02_245) EDN: XQEDVC

Original study article

DOI: [https://doi.org/10.52899/24141437\\_2025\\_02\\_245](https://doi.org/10.52899/24141437_2025_02_245)

EDN: XQEDVC

# Heat Treatment of Laser Welded Dissimilar Al-Cu-Li Joints With Significant Li/Cu Ratio Difference

Igor E. Vitoshkin<sup>1</sup>, Alexander G. Malikov<sup>1</sup>, Alexey P. Zavjalov<sup>2</sup>, Nomina Yu. Burkhinova<sup>1</sup>, Evgeniy V. Karpov<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Khristianovich Institute of Theoretical and Applied Mechanics of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, Russia;

<sup>2</sup> Borekov Institute of Catalysis, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, Russia;

<sup>3</sup> Lavrentyev Institute of Hydrodynamics of Siberian Branch of Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, Russia

## ABSTRACT

**BACKGROUND:** Joining dissimilar materials is a complex but important task for industry as dissimilar materials are necessary in complex structures. This paper presents the results of microstructure optimization of a laser welded dissimilar Al-Cu-Li joint with different Cu/Li ratios.

**AIM:** The aim was to study the structure of a laser welded dissimilar Al-Cu-Li joint and to develop methods to improve this structure based on heat treatment.

**METHODS:** We used scanning electron microscopy, synchrotron radiation diffraction, and tensile testing. Synchrotron radiation (SR) diffraction allowed to detect lithium-containing phases, where they cannot be fully detected using less bright radiation sources due to their volume fraction and scattering.

**RESULTS:** The study shows that welding promotes creation of a mechanically unfavorable microstructure; dendritic grains of aluminum surrounded by an eutectic network of intermetallic compounds  $T_1Al_2CuLi$ ,  $T_2Al_6CuLi_3$ , and  $T_3Al_5CuLi_3$ . In this state, the weld seam had low mechanical properties; tensile strength  $\sigma_B$  was 252 MPa, yield strength  $\sigma_{0.2}$  was 184 MPa, and linear strain  $\delta$  was 2.9%. Thermal quenching at 530 °C allowed to almost completely dissolve the eutectic network, which was confirmed by scanning electron microscopy. Artificial aging at 170 °C for 16 hours allowed for the recrystallization of the strengthening phases. As a result, the welded joint tensile strength  $\sigma_B$  increased to 344 MPa, yield strength  $\sigma_{0.2}$  increased to 230 MPa and the linear strain  $\delta$  increased to 4.8%.

**CONCLUSION:** The study allowed to identify the structure of laser welded dissimilar Al-Cu-Li joints and showed that this structure can be improved by heat treatment, ensuring a significant increase in both the strength properties and ductility of the joint.

**Keywords:** aluminum alloys; dissimilar welding; laser welding; heat treatment; synchrotron radiation diffraction; scanning electron microscopy; tensile testing.

## To cite this article

Vitoshkin IE, Malikov AG, Zavjalov AP, Burkhinova NYu, Karpov EV. Heat Treatment of Laser Welded Dissimilar Al-Cu-Li Joints With Significant Li/Cu Ratio Difference. *Transactions of the Saint Petersburg State Marine Technical University*. 2025;4(2):245–252. DOI: 10.52899/24141437\_2025\_02\_245 EDN: XQEDVC

Submitted: 10.04.2025

Accepted: 21.04.2025

Published online: 27.06.2025

## 1. ВВЕДЕНИЕ

Создание сложных конструкций зачастую требует применения множества различных материалов, отвечающих различным, иногда неприменимым к одному материалу, требованиям. Современные авиационные конструкции не исключение. Например, в работе [1] насчитывается более двадцати различных сплавов, применяемых в конструкции одной модели самолета.

Новейшие алюминий-литиевые сплавы третьего поколения уже находят широкое применение в авиационной промышленности [2]. Несмотря на их превосходные механические свойства, технологии их соединения не позволяют полностью раскрыть их потенциал. В настоящее время для этого применяется клепаное соединение, которое, несмотря на почти полное отсутствие ограничений в применимости к каким-либо материалам, обладает существенными недостатками: большая трудоемкость и опасность производства, существенное снижение надежности конструкции и, что немаловажно, существенное влияние на массу конструкции [1]. Применение лазерной сварки взамен клепаного соединения может позволить исключить или по крайней мере существенно уменьшить влияние этих факторов на характеристики авиационных конструкций. Однако для этого необходимо решить проблему микроструктурных изменений, к которым неизбежно приводит процесс сварки.

Данную проблему можно решить, применяя термическую обработку (ТО) к сварным соединениям. В данной работе представлены первые шаги в разработке такой ТО для сварных соединений пары сплавов В-1461/В-1469. Хотя качественно эти сплавы практически не имеют различий в химическом составе, соотношение Li/Cu (определяющее фазовый состав Al-Cu-Li сплавов) существенно отличается: ~6,0 для В-1461 против ~2,8 для В-1469 (в атомных долях). Таким образом, целью данной работы являлось определение влияния температуры закалки на получаемые в результате ТО механические свойства сварного лазерного соединения этих сплавов.

## 2. МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В качестве материалов использовались 2-мм листы сплавов В-1461 и В-1469. Их химический состав

представлен в табл. 1. Для сварки применялся волоконный лазер производства IPG с длиной волны 1,07 мкм. Параметры режимов сварки были подобраны на предварительном этапе исследования:  $P = 3$  кВт,  $V = 2,1$  м/мин,  $\Delta F = 0$  ( $P$  — мощность излучения,  $V$  — скорость сварки,  $\Delta F$  — положение фокуса относительно поверхности пластины).

Термическая обработка включала закалку в воде и искусственное старение. Поскольку целью работы являлось определение влияния температуры закалки на конечные свойства сварного соединения, были выбраны две температуры закалки — 530 и 560 °С и одна температура старения — 170 °С. При этом время выдержки составляло 30 минут для закалки и 32 часа для старения в обоих случаях.

Испытания на растяжение выполнялись на электро-механической универсальной разрывной машине Zwick/Roell. Относительное удлинение измерялось при помощи экстензометра на базе 20 мм, в центре которой располагался сварной шов шириной около 1 мм. Рабочее сечение образца составляло  $2 \times 10$  мм.

Микроструктурные исследования осуществлялись при помощи растрового электронного микроскопа Carl Zeiss EVO MA 15, оснащенного детекторами обратно-рассеянных (BSD) и вторичных (SE) электронов, а также EDX-детектором Oxford Instruments X-Max 80.

Рентгенофазовые исследования проводились при помощи анализа дифракции синхротронного излучения (СИ), полученной на 8-м канале экспериментальной станции накопительного кольца ВЭПП-4 «Диагностика рентгеновским излучением высоких энергий» на базе электрон-позитронных ускорителей комплекса ВЭПП-4 — ВЭПП-2000 в Институте ядерной физики СО РАН [4]. Накопление сигнала (рис. 1) происходило в геометрии Дебая – Шеррера на плоском двумерном детекторе Mar345 (MarResearch, Германия). Накопление сигнала происходило в центре сварного шва и на удалении от него на ~5 мм по обе стороны от него (для исследования исходных сплавов). Длина волны составляла 0,2591 Å (47,85 кэВ). Пучок имел квадратное сечение с размером сторон 300 мкм. Дистанция между образцом и детектором составляла примерно 610 мм. Толщина образцов — 2 мм. Двумерные картины дифракции преобразовывались в одномерные посредством интегрирования вокруг центрального рефлекса при помощи Area Diffraction Machine [5]. Анализ полученных картин дифракции осуществлялся путем соотношения

Таблица 1. Химический состав сплавов В-1461 и В-1469 (вес. %) [3]

Table 1. Chemical composition of В-1461 and В-1469 alloys (weight %) [3]

Сплав	Al	Li	Cu	Mg	Si	Fe	Zr	Sc	Mn	Другие
В-1461	Осн.	1,5–1,95	2,5–2,95	0,05–0,12	≤ 0,08	0,01–0,1	0,05–0,12	0,05–0,10	0,2–0,6	Zn: 0,2–0,8 Cr: 0,01–0,05 Ni: 0,05–0,15
В-1469	Осн.	1,0–1,5	3,2–4,5	0,1–0,5	≤ 0,1	≤ 0,12	0,04–0,2	0,04–0,15	0,003–0,5	Ag: 0,15–0,6

положений полученных рефлексов теоретическим положениям для предполагаемых фаз, рассчитанным согласно кристаллографической информации в базе данных Springer Materials [6, 7] и в работе [8]. При построении профилей дифракции каждый из них был нормализован на максимальное значение внутри соответствующего набора данных.

## 3. РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

### 3.1. Механические испытания

На рис. 2 представлены результаты механических испытаний сварных соединений до ТО, а также после ТО с двумя разными температурами закалки. Значения нормированы на значения соответствующих показателей сплава В-1461, абсолютные значения которых составляли:  $\sigma_B = 550$  МПа,  $\sigma_{0,2} = 470$  МПа,  $\delta = 10,1$  %. Результаты испытаний показали, что более высокая температура закалки позволяет сделать материал шва более пластичным в результате старения. В то же время более низкая температура закалки позволила получить более высокие прочностные показатели. Поскольку прочностные показатели являются более значимыми для сварных соединений, температура закалки 530 °С была принята как оптимальная в данном исследовании. Микроструктурные и рентгенофазовые исследования, описанные в последующих главах, будут относиться к сварному соединению, обработанному по этому режиму ТО.

### 3.2. Растровая электронная микроскопия

На рис. 3 представлены результаты растровой электронной микроскопии (РЭМ) в режиме BSD. В красных квадратах показан снимок той же области с дополнительным

увеличением в 2,5 раза. Стрелки с арабскими числами указывают на частицы, исследованные EDX. Кресты с римскими числами указывают на точку анализа химического состава зерен алюминия. Результаты EDX в указанных точках представлены в табл. 2.

РЭМ показала, что исходные сплавы не подвергаются изменениям в результате ТО, которые бы можно было заметить используемым методом. В сплаве В-1461 наблюдаются частицы двух типов: крупные, с размером больше 1 мкм (рис. 3, *a-c*, стрелки 1–3), и мелкие, с размером менее 1 мкм (в красных квадратах на рис. 3, *a-c*). Согласно результатам EDX-анализа (табл. 2), в крупных частицах имеется повышенная концентрация меди, а также таких элементов, как Fe, Mn, Ni и Ca. Хотя, некоторые из этих элементов не заявлены в химическом составе производителем, они могут попасть в сплав вследствие неизбежного загрязнения, в результате чего они формируют подобные частицы вместе с остальными легирующими элементами.

Сплав В-1469 имеет подобную микроструктуру (рис. 3, *g-i*), однако крупные частицы можно разделить на два вида: обогащенные Fe, Ni и Mn (стрелки 8 и 11), как в предыдущем случае, и обогащенные Zr и Sc (стрелки 7, 9 и 10). Частицы того и другого типов также содержат большое количество меди.

Исследование шва показало (рис. 3, *d-f*), что процесс сварки приводит к существенному изменению микроструктуры материала. До ТО она состояла из дендритных зерен алюминия, окруженных сеткой из богатой медью и магнием эвтектики. Закалка привела к растворению большей части этой эвтектики, что увеличило концентрацию легирующих элементов внутри зерен алюминия (табл. 2, точки IV и V).

Как было замечено, часть окружающей зёрна алюминия сетчатой структуры в сварном шве осталась, несмотря

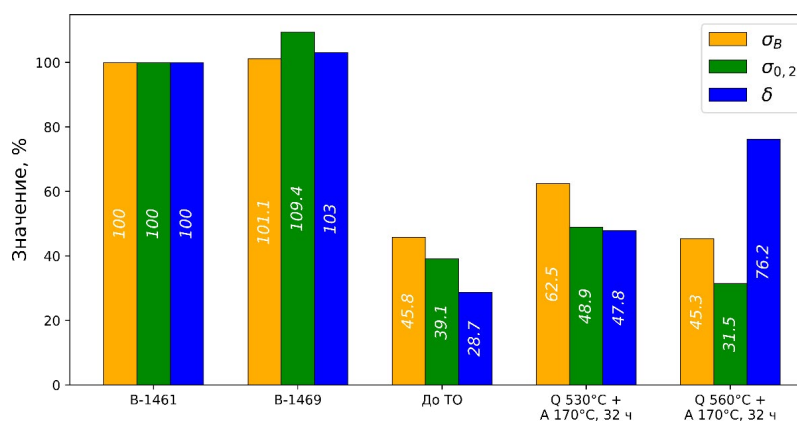
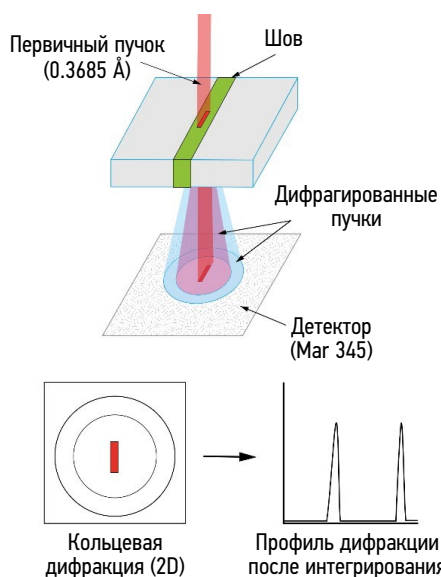


Рис. 2. Результаты испытаний на растяжение (Q — закалка, A — старение).  
Fig. 2. Tensile testing (Q, thermal quenching, A, aging).

Рис. 1. Схема процесса записи и преобразования картин дифракции.  
Fig. 1. Diffraction pattern recording and conversion diagram.

Таблица 2. Результаты EDX-анализа (ат. %)

Table 2. EDX analysis (at %)

Точка	Al	Cu	Mg	Zn	Sc	Zr	Mn	Fe	Ni	Si	Ca
1	96,61	1,97	0,56	0,21	0,10	–	0,15	0,15	–	–	0,26
2	94,02	3,84	0,48	0,18	–	–	0,16	1,16	0,16	–	–
3	95,77	2,79	0,50	0,22	–	–	0,22	–	–	–	0,50
I	98,16	1,15	0,54	0,14	–	–	–	–	–	–	–
II	98,12	1,09	0,57	0,22	–	–	–	–	–	–	–
III	98,17	1,12	0,51	0,20	–	–	–	–	–	–	–
4	92,32	5,78	1,14	0,27	0,09	–	–	0,17	–	0,22	–
5	92,90	6,40	0,30	–	0,30	–	–	0,10	–	–	–
6	94,50	4,71	0,42	–	0,13	–	–	0,13	–	–	0,11
IV	99,61	0,27	0,12	–	–	–	–	–	–	–	–
V	98,59	1,14	0,26	–	–	–	–	–	–	–	–
VI	98,56	1,09	0,35	–	–	–	–	–	–	–	–
7	96,36	2,30	0,24	–	0,79	0,31	–	–	–	–	–
8	79,88	13,60	–	–	–	–	0,52	5,75	0,25	–	–
9	87,08	11,27	0,18	–	1,33	–	–	–	–	–	0,15
10	95,01	4,31	0,24	–	0,44	–	–	–	–	–	–
11	87,61	8,52	0,21	–	–	–	0,35	3,10	0,21	–	–
VII	98,46	1,31	0,23	–	–	–	–	–	–	–	–
VIII	98,52	1,23	0,25	–	–	–	–	–	–	–	–
IX	98,54	1,23	0,23	–	–	–	–	–	–	–	–

\* Li не может быть обнаружен используемым методом

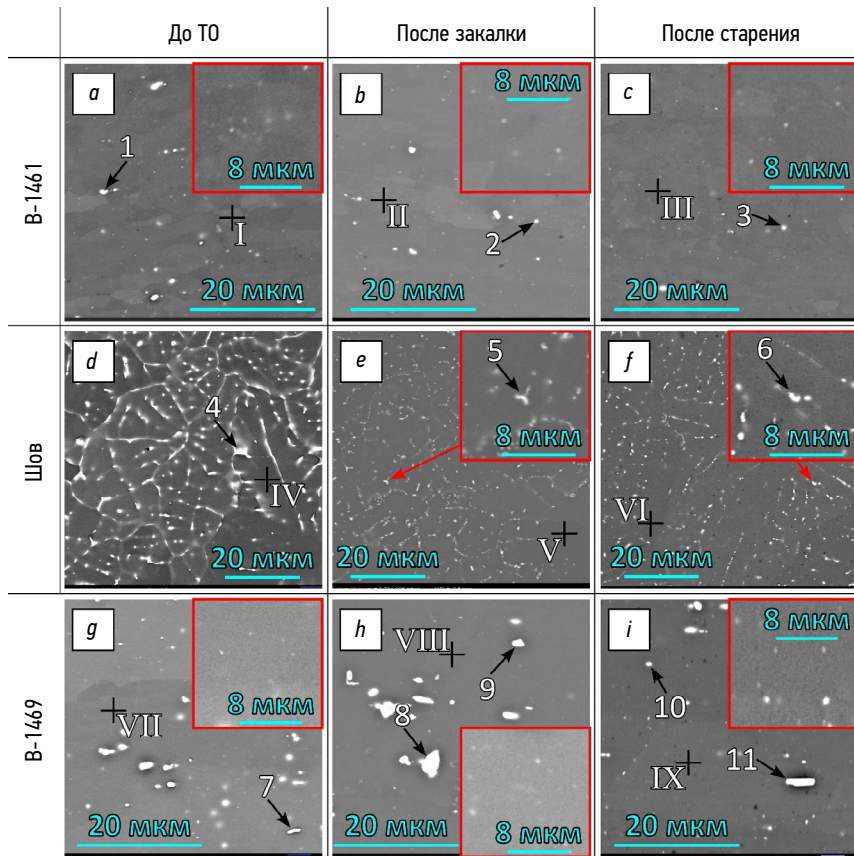


Рис. 3. Микроструктура (РЭМ) до и после каждого этапа ТО сплава В-1461 (а–с), сварного шва (d–f) и сплава В-1469 (g–i).  
Fig. 3. Microstructure (SEM) before and after each heat treatment stage of B-1461 alloy (a–c), weld seam (d–f), and B-1469 alloy (g–i).

на закалку (рис. 3, *d-f*). Учитывая, что оставшиеся частицы имеют схожий химический состав (высокое содержание меди, присутствие Fe и Sc), можно сделать вывод, что эти частицы имеют ту же природу, что и найденные в исходных сплавах.

## АНАЛИЗ ДИФРАКЦИИ СИ

Анализ дифракции СИ показал существенные изменения в качественном фазовом составе сварного соединения

(рис. 4, *a*). В отличие от В-1461 (рис. 4, *b*), в сварном шве не наблюдается рефлексов  $\delta'$ -фазы. К тому же пики фаз  $\tau_{1-3}$  и  $Al_{20}Cu_2Mn_3$  заметно слабее, нежели в сплаве В-1469 (рис. 4, *c*).

На дифрактограммах видно (рис. 4, *a, c*), что сварной шов и сплав В-1469 реагируют на ТО похожим образом. Несмотря на то что обычно закалка приводит к формированию пересыщенного твердого раствора взамен упрочняющих частиц (как это произошло в случае с В-1461, рис. 4, *b*), в случае сварного шва и сплава В-1469 закалка

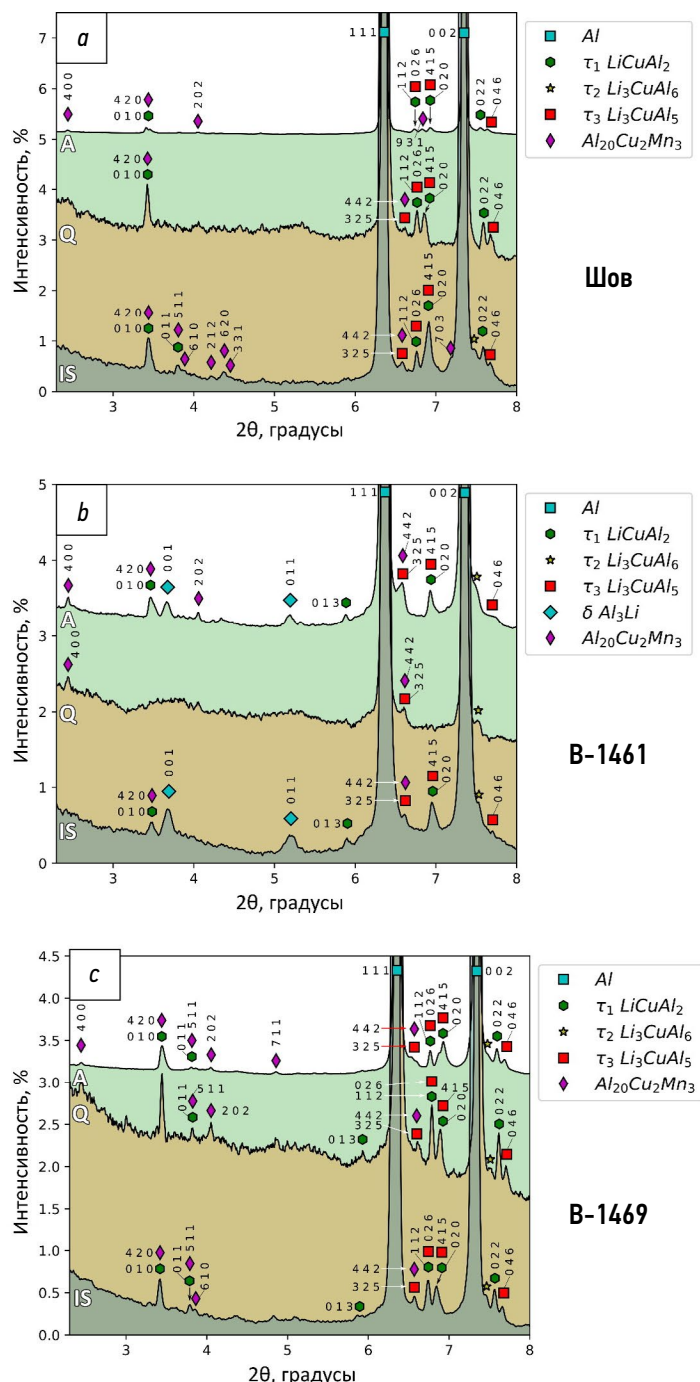


Рис. 4. Профили дифракции СИ для сварного соединения (*a*), сплава В-1461 (*b*) и сплава В-1469 (*c*) в исходном состоянии (IS), после закалки (Q) и старения (A).

Fig. 4. Synchrotron radiation (SR) diffraction profiles of the welded joint (*a*), B-1461 alloy (*b*), and B-1469 alloy (*c*) in the initial state (IS), after thermal quenching (Q), and aging (A).

привела дополнительному росту объема упрочняющих фаз, что можно заключить из существенного увеличения интенсивности рефлексов этих фаз ( $\tau_1$  0 2 2 и  $\tau_3$  0 4 6). Материал шва и сплав В-1469 отреагировали на закалку также нетипично: несмотря на ожидаемый дальнейший рост объема упрочняющих фаз, существенный их объем, напротив, уменьшился. Поскольку в данной работе не применялась просвечивающая электронная микроскопия, дальнейшее изучение этого феномена было невозможно.

Сплав В-1461 реагировал на ТО типично: закалка привела к формированию пересыщенного твердого раствора за счет растворения упрочняющих фаз, а старение привело к его распаду с выделением этих фаз.

Поскольку интенсивность рефлексов фазы  $Al_{20}Cu_2Mn_3$  была крайне мала, анализ ее поведения и отклика на ТО не был возможен.

## 4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Согласно результатам проведенных исследований можно заключить, что:

1. Сварка приводит к формированию нежелательной микроструктуры, состоящей из дендритных зерен алюминия, окруженных сеткой из различных интерметаллидных соединений, из-за чего сварной шов до ТО имеет низкие механические свойства:  $\sigma_B = 252$  МПа,  $\sigma_{0,2} = 184$  МПа и  $\delta = 2,9$  %.

2. Температура закалки существенно влияет на конечные механические свойства сварного соединения. При одинаковых параметрах искусственного старения закалка при 530 °С приводит к большему приросту прочностных свойств, но меньшему приросту пластичности материала сварного шва ( $\sigma_B = 344$  МПа,  $\sigma_{0,2} = 230$  МПа и  $\delta = 4,8$  %) по сравнению с закалкой при 560 °С ( $\sigma_B = 249$  МПа,  $\sigma_{0,2} = 148$  МПа и  $\delta = 7,7$  %).

3. Еще одним важным эффектом процесса закалки было почти полное исчезновение интерметаллидной сетки вокруг зерен алюминия. Сами зёрна алюминия приобрели круглую форму взамен дендритной.

4. Материал сварного шва и сплав В-1469 отреагировал на ТО необычно: вместо формирования твердого раствора после закалки вторичные фазы, напротив, увеличили свой объем. Это может быть связано с недостатком высокой температурой закалки, из-за чего упрочняющие частицы не растворились, а имеющийся твердый раствор распался с образованием дополнительных частиц или укрупнением имеющихся.

## ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ИНФОРМАЦИЯ

**Вклад авторов.** И.Е. Витошкин — поиск публикаций по теме статьи, написание текста рукописи, анализ дифракции СИ, анализ и оформление результатов РЭМ, анализ и оформление результатов механических испытаний; А.Г. Маликов — поиск публикаций по теме статьи, концептуализация, поиск финансирования, участие в написании рукописи; А.П. Завьялов — осуществление съёмки дифракции СИ, участие в написании рукописи; Н.Ю. Бурхинова — осуществление РЭМ, участие в написании рукописи; Е.В. Карпов — проведение механических испытаний, участие в написании рукописи. Все авторы одобрили рукопись (версию для публикации), а также согласились нести ответственность за все аспекты работы, гарантируя надлежащее рассмотрение и решение вопросов, связанных с точностью и добросовестностью любой её части.

**Источники финансирования.** Данная работа выполнена в рамках государственного задания Института теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича СО РАН Министерства науки и высшего образования РФ. А.П. Завьялов благодарен Министерству науки и высшего образования РФ за финансовую поддержку в рамках государственного задания ЦКП «СКИФ» Института катализа СО РАН (FWUR-2024-0042). В работе использовалось оборудование ЦКП «СЦСТИ» на базе УНУ «Комплекс ВЭПП-4 — ВЭПП-2000» в ИЯФ СО РАН.

**Конфликт интересов.** Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией настоящей статьи.

**Генеративный искусственный интеллект.** При создании настоящей статьи технологии генеративного искусственного интеллекта не использовались.

## ADDITIONAL INFO

**Author contributions:** I.E. Vitoshkin: investigation, writing—original draft, formal analysis; A.G. Malikov: investigation, conceptualization, funding acquisition, writing—original draft; A.P. Zavyalov: visualization, writing—original draft; N.Yu. Burkinova: investigation, writing—original draft; E.V. Karpov: validation, writing—original draft. All the authors approved the version of the manuscript to be published and agreed to be accountable for all aspects of the work, ensuring that questions related to the accuracy or integrity of any part of the work are appropriately investigated and resolved.

**Funding sources:** The study was conducted within the state assignment of the Khristianovich Institute of Theoretical and Applied Mechanics, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation. A.P. Zavyalov expresses gratitude to the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation for financial support within the state assignment of the Center for Collective Use “Siberian Ring Photon Source” of the Institute of Catalysis, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (FWUR-2024-0042). The study used equipment from the Center for Collective Use “Siberian Center for Synchrotron and Terahertz Radiation,” and the VEPP-4-VEPP-2000 Complex, a unique scientific installation, at the Budker Institute of Nuclear Physics, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences.

**Disclosure of interests:** The authors have no explicit or potential conflicts of interests associated with the publication of this article.

**Generative AI:** No generative artificial intelligence technologies were used to prepare this article.



## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Dursun T., Soutis C. Recent developments in advanced aircraft aluminium alloys // *Materials & Design* (1980–2015). 2014. № 56. P. 862–871. doi: 10.1016/j.matdes.2013.12.002
2. Abd El-Aty A, Xunzhong G., Shi-Hong Zh., et al. Strengthening mechanisms, deformation behavior, and anisotropic mechanical properties of Al-Li alloys: A review // *Journal of Advanced Research*. 2018. № 10. P. 49–67. doi: 10.1016/j.jare.2017.12.004
3. Kablov E. N., Antipov V. V., Oglodkova J. S., Oglodkov M. S. Development and Application Prospects of Aluminum–Lithium Alloys in Aircraft and Space Technology // *Metallurgist*. 2021. № 65 (1). P. 72–81. doi: 10.1007/s11015-021-01134-9
4. Piminov C. A., Baranov G. N., Bogomyagkov A. V., et al. Synchrotron Radiation Research and Application at VEPP-4 // *Physics Procedia*. 2016. № 84. P. 19–26. doi: 10.1016/j.phpro.2016.11.005
5. The Area Diffraction Machine: Analyze 2D powder diffraction data. Дата обращения: 12.09.2024. Режим доступа: <https://github.com/joshualande/AreaDiffractionMachine>
6. Al-Cu-Li Ternary Phase Diagram Evaluation // Springer Materials. Дата обращения: 12.09.2024. Режим доступа: [https://materials.springer.com/msi/docs/sm\\_msi\\_r\\_10\\_015854\\_02](https://materials.springer.com/msi/docs/sm_msi_r_10_015854_02)
7. Al-Li-Mg Ternary Phase Diagram Evaluation // Springer Materials. Дата обращения: 12.09.2024. Режим доступа: [https://materials.springer.com/msi/docs/sm\\_msi\\_r\\_10\\_012175\\_03](https://materials.springer.com/msi/docs/sm_msi_r_10_012175_03)
8. Shen Z., Chunhui L., Qingqing D., et al. The structure determination of Al<sub>20</sub>Cu<sub>2</sub>Mn<sub>3</sub> by near atomic resolution chemical mapping // *Journal of Alloys and Compounds*. 2014. № 601. P. 25–30. doi: 10.1016/j.jallcom.2014.02.125

## REFERENCES

1. Dursun T, Soutis C. Recent developments in advanced aircraft aluminium alloys. *Materials & Design* (1980–2015). 2014;56:862–871. doi: 10.1016/j.matdes.2013.12.002
2. Abd El-Aty A, Xunzhong G, Shi-Hong Zh, et al. Strengthening mechanisms, deformation behavior, and anisotropic mechanical properties of Al-Li alloys: A review. *Journal of Advanced Research*. 2018;10:49–67. doi: 10.1016/j.jare.2017.12.004
3. Kablov EN, Antipov VV, Oglodkova JS, Oglodkov MS. Development and Application Prospects of Aluminum–Lithium Alloys in Aircraft and Space Technology. *Metallurgist*. 2021;65(1):72–81. doi: 10.1007/s11015-021-01134-9
4. Piminov CA, Baranov GN, Bogomyagkov AV, et al. Synchrotron Radiation Research and Application at VEPP-4. *Physics Procedia*. 2016;84:19–26. doi: 10.1016/j.phpro.2016.11.005
5. The Area Diffraction Machine: Analyze 2D powder diffraction data. Accessed: 12.09.2024. Available from: <https://github.com/joshualande/AreaDiffractionMachine>
6. Al-Cu-Li Ternary Phase Diagram Evaluation // Springer Materials. Accessed: 12.09.2024. Available from: [https://materials.springer.com/msi/docs/sm\\_msi\\_r\\_10\\_015854\\_02](https://materials.springer.com/msi/docs/sm_msi_r_10_015854_02)
7. Al-Li-Mg Ternary Phase Diagram Evaluation // Springer Materials. Accessed: 12.09.2024. Available from: [https://materials.springer.com/msi/docs/sm\\_msi\\_r\\_10\\_012175\\_03](https://materials.springer.com/msi/docs/sm_msi_r_10_012175_03)
8. Shen Z, Chunhui L, Qingqing D, et al. The structure determination of Al<sub>20</sub>Cu<sub>2</sub>Mn<sub>3</sub> by near atomic resolution chemical mapping. *Journal of Alloys and Compounds*. 2014;601:25–30. doi: 10.1016/j.jallcom.2014.02.125

## ОБ АВТОРАХ

**\*Игорь Евгеньевич Витошкин**, младший научный сотрудник, Институт теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича СО РАН; адрес: Россия, 630090, Новосибирск, ул. Институтская, д. 4/1; eLibrary SPIN: 1325-8521, ORCID: 0000-0001-5096-7250; e-mail: [ghatu0oosj37@mail.ru](mailto:ghatu0oosj37@mail.ru)

**Александр Геннадьевич Маликов**, д-р техн. наук, заведующий лабораторией, Институт теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича СО РАН; eLibrary SPIN: 2488-7130; ORCID: 0000-0003-1268-8546; e-mail: [smalik707@yandex.ru](mailto:smalik707@yandex.ru)

**Алексей Павлович Завьялов**, канд. физ.-мат. наук, старший научный сотрудник, Центр коллективного пользования «Сибирский кольцевой источник фотонов» Института катализа СО РАН; eLibrary SPIN: 3930-7861; ORCID: 0000-0001-9893-6840; e-mail: [zav\\_alexey@list.ru](mailto:zav_alexey@list.ru)

**Номина Юмжаповна Бурхинова**, лаборант, Институт теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича СО РАН; e-mail: [nomina.burkhinova@mail.ru](mailto:nomina.burkhinova@mail.ru)

**Евгений Викторович Карпов**, главный научный сотрудник, Институт гидродинамики им. М.А. Лаврентьева СО РАН; eLibrary SPIN: 5140-9752; ORCID: 0000-0003-3089-5776; e-mail: [evkarpov@mail.ru](mailto:evkarpov@mail.ru)

## AUTHORS' INFO

**\*Igor E. Vitoshkin**, Junior Research Associate, Khristianovich Institute of Theoretical and Applied Mechanics of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences; address: 4/1 Institutskaya st., Novosibirsk, 630090, Russia; eLibrary SPIN: 1325-8521; ORCID: 0000-0001-5096-7250; e-mail: [ghatu0oosj37@mail.ru](mailto:ghatu0oosj37@mail.ru)

**Alexander G. Malikov**, Dr. Sci. (Engineering), Khristianovich Institute of Theoretical and Applied Mechanics of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences; eLibrary SPIN: 2488-7130; ORCID: 0000-0003-1268-8546; e-mail: [smalik707@yandex.ru](mailto:smalik707@yandex.ru)

**Alexey P. Zavjalov**, Cand. Sci. (Physics and Mathematics), Senior Research Associate, Boreskov Institute of Catalysis, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences; eLibrary SPIN: 3930-7861; ORCID: 0000-0001-9893-6840; e-mail: [zav\\_alexey@list.ru](mailto:zav_alexey@list.ru)

**Nomina Yu. Burkhinova**, laboratory assistant, Khristianovich Institute of Theoretical and Applied Mechanics of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences; e-mail: [nomina.burkhinova@mail.ru](mailto:nomina.burkhinova@mail.ru)

**Evgeniy V. Karpov**, Chief Research Associate, Lavrentyev Institute of Hydrodynamics of Siberian Branch of Russian Academy of Sciences; eLibrary SPIN: 5140-9752; ORCID: 0000-0003-3089-5776; e-mail: [evkarpov@mail.ru](mailto:evkarpov@mail.ru)

\* Автор, ответственный за переписку / Corresponding author

Оригинальное исследование

УДК 621.373.826

DOI: [https://doi.org/10.52899/24141437\\_2025\\_02\\_253](https://doi.org/10.52899/24141437_2025_02_253)

EDN: WJCPRD

# Результаты исследования технологической среды оптического спектра при лазерных процессах обработки материалов

О.А. Крючина<sup>1</sup>, И.Н. Шиганов<sup>2</sup><sup>1</sup> ООО «ВПГ Лазеруан», Москва, Россия;<sup>2</sup> Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана, Москва, Россия

## АННОТАЦИЯ

**Обоснование.** Лазерные технологические процессы, особенно высокомошные, всегда сопровождаются отраженным, рассеянным излучением различного спектра, повышенной яркостью света, которые до настоящего времени подробно изучены не были. С учётом развития технологического оборудования, появления и широкого внедрения ручных систем лазерной обработки, роста мощностей лазеров, задача исследования сопутствующих излучений в лазерных технологических процессах становится особо актуальной.

**Цель работы** — определение спектральных диапазонов, интенсивности отражённого и рассеянного лазерного и сопутствующего излучения при выполнении основных технологических процессов лазерной обработки различных металлов и сплавов.

**Материалы и методы.** В качестве исследуемых материалов выбраны углеродистая сталь 09Г2С, нержавеющая сталь 12Х18Н10Т, титановый сплав ВТ6, алюминиевый сплав АМг6. Измерения проводились на специализированном стенде, созданном для проведения указанных работ, по специально разработанной методике.

**Выводы.** Результаты измерений показали превышения предельно допустимых уровней и интенсивностей для отражённого и рассеянного лазерного излучения и УФ-С излучения во всех исследуемых процессах и в ряде случаев превышения для УФ-В излучения. Полученные результаты говорят о необходимости применения средств защиты и от лазерного, и от УФ- излучения при обработке указанных материалов в исследованных технологических процессах.

**Ключевые слова:** лазерное технологическое оборудование; технологическая среда оптического спектра; лазерные технологические процессы; облученность от лазерного излучения; энергетическая освещенность сопутствующего излучения; спектральный анализ.

## Как цитировать

Крючина О.А., Шиганов И.Н. Результаты исследования технологической среды оптического спектра при лазерных процессах обработки материалов // Труды Санкт-Петербургского государственного морского технического университета. 2025. Т. 4, № 2. С. 253–258. DOI: 10.52899/24141437\_2025\_02\_253 EDN: WJCPRD

Original study article

DOI: [https://doi.org/10.52899/24141437\\_2025\\_02\\_253](https://doi.org/10.52899/24141437_2025_02_253)

EDN: WJCPRD

# Optical Spectrum Process Environment in Laser Material Processing: A Study

Olga A. Kryuchina<sup>1</sup>, Igor N. Shiganov<sup>2</sup><sup>1</sup> LLC NTO IRE-Polus, Moscow, Russia;<sup>2</sup> Moscow State Technical University named after Bauman, Moscow, Russia

## ABSTRACT

**BACKGROUND:** Laser processes—especially high-power ones—are usually associated with reflected and scattered radiation of various spectra and increased light intensity, which have not yet been studied in detail. Due to the development of process equipment, the development and widespread use of manual laser processing systems, and the growth of laser power, the studies of collateral radiation in laser processes are becoming particularly relevant.

**AIM:** To determine the spectral ranges and the intensity of reflected and scattered laser and collateral radiation during basic laser processing of various metals and alloys.

**MATERIALS AND METHODS:** We tested carbon steel (C345), stainless steel (AISI 321), a titanium alloy VT6 (Grade 5), and an aluminum alloy (AlMg6). The tests were performed on a special test bench using a special method.

**CONCLUSIONS:** The tests showed that the maximum permissible levels and intensity of reflected and scattered laser radiation, UV-C radiation, and—in some cases—UV-B radiation were exceeded in all studied processes. The results indicate the need to use both laser and UV radiation protection equipment when processing the specified materials in the studied processes.

**Keywords:** laser process equipment; process environment of the optical spectrum; laser processes; laser radiation exposure; collateral irradiation; spectral measurement.

## To cite this article

Kryuchina OA, Shiganov IN. Optical Spectrum Process Environment in Laser Material Processing: A Study. *Transactions of the Saint Petersburg State Marine Technical University*. 2025;4(2):253–258. DOI: 10.52899/24141437\_2025\_02\_253 EDN: WJCPRD

Submitted: 04.04.2025

Accepted: 21.04.2025

Published online: 25.06.2025

## ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время насчитываются сотни областей практического применения лазеров. В различных отраслях промышленности наиболее популярными и востребованными считаются технологические установки, системы и роботизированные комплексы, спроектированные на базе волоконных лазеров [1].

Лазерные технологические процессы (ЛТП), особенно высокоомощные, всегда сопровождаются отраженным, рассеянным излучением различного спектра и повышенной яркостью света. В зависимости от типа лазерной технологии и обрабатываемого материала вид и интенсивность сопутствующих факторов варьируются [2].

Для того чтобы описать процессы взаимодействия лазерного излучения (ЛИ) с обрабатываемыми материалами, сформулирован термин «технологическая среда оптического спектра» (ТСОС), под которым понимается совокупность таких факторов, как отраженное и рассеянное ЛИ, сопутствующее излучение от пароплазменного факела и обрабатываемого материала, возникающих во время ЛТП, влияющих на протекание процесса и на персонал.

## ИЗМЕРЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ СРЕДЫ ОПТИЧЕСКОГО СПЕКТРА ПРИ ЛАЗЕРНЫХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССАХ

В общем случае существуют два типа исследования ТСОС: качественный и количественный (рис. 1). К качественному типу относятся методы по определению спектральных характеристик ТСОС, которые позволяют оценить спектральный состав, определить наиболее интенсивные линии и области спектра и наличие излучения в невидимых диапазонах длин волн (УФ, ИК). К количественному типу относятся методики по измерению энергетических характеристик излучения в конкретных диапазонах длин

волн для определения значений и оценки степени потенциальной опасности излучения.

Для определения спектрального состава ТСОС выбран метод оптической спектроскопии, в основе которого лежит исследование излучения лазерной плазмы. Данный метод наиболее простой и доступный для проведения спектрального анализа во время ЛТП. Для измерения спектрального состава выбран автоматизированный монохроматор/спектрограф M266 фирмы SOLAR (рис. 2) [3].

Спектральный анализ проводился непосредственно в процессе обработки (лазерной маркировки) различных материалов (углеродистая сталь 09Г2С, нержавеющая сталь 12Х18Н10Т, титановый сплав ВТ6, алюминиевый сплав АМг6) излучением волоконного лазера с длиной волны 1070 нм. Обработка проводилась на мощности 150 Вт (с плотностью мощности  $2,4 \cdot 10^6$  Вт/см<sup>2</sup>), что позволило получить факел необходимого размера и не расплавлять металл до разбрызгивания.

На рис. 3 показаны спектры лазерной плазмы образцов исследуемых материалов в наложении друг на друга. По оси ординат указано число отсчетов фотоумножителя, которое пропорционально относительной интенсивности, а по оси абсцисс — длина волны излучения. Ширина спектральных линий обусловлена шумами. Спектры имеют характерные спады интенсивности в областях 400 нм и 600 нм. Это связано с тем, что при измерениях использовались светофильтры, которые имеют переходные зоны именно в этих местах [4].

Из рис. 3 видно, что самый интенсивный спектр зафиксирован при обработке титанового сплава ВТ6. Спектры плазмы образцов стали 09Г2С и 12Х18Н10Т по многим линиям совпадают. Спектр плазмы образца алюминиевого сплава АМг6 имеет наименьшую относительную интенсивность по сравнению с остальными. Экспериментально было установлено, что плазма, возникающая от воздействия ЛИ на обрабатываемый материал, создает спектр излучения, образованный многочисленными полосами, которые располагаются в УФ, видимой и ИК-областях спектра. Эти значения характерны для исследованных материалов [5].



Рис. 1. Иллюстрация концепции исследования технологической среды оптического спектра.

Fig. 1. Illustrated concept of the study on the process environment of the optical spectrum.



Рис. 2. Внешний вид автоматизированного монохроматора/спектрографа M266 фирмы SOLAR.

Fig. 2. View of SOLAR M266 automated monochromator / spectrograph.

Для комплексной количественной оценки энергетических характеристик ТСОС сотрудниками ООО НТО «ИРЭ-Полюс» был разработан специализированный измерительный стенд, который включает в себя приборы серии АРГУС: радиометры, люксметр, яркомер и лазерный дозиметр. Фотография стенда приведена на рис. 4 [6].

Для проведения измерений стенд с приборами помещается в зоне нахождения оператора во время ЛТП. Точки контроля выбраны на траекториях зеркального отражения лазерного излучения на расстоянии 1000 мм от поверхности основного материала. Приборы включаются до начала ЛТП. Во время ЛТП происходит измерение требуемых параметров. Поскольку приборы типа АРГУС не имеют функции запоминания измеренных значений, то для регистрации показаний используется видеофиксация. Получение итоговых значений происходит путем обработки видеофайлов [7, 8].

В табл. 1 приведены сводные результаты измерений уровней максимальной облученности от отраженного ЛИ при рабочих режимах различных технологических процессов для указанных марок металлов и сплавов. Для оценки потенциальной опасности измеренные значения сравниваются с предельно допустимыми уровнями (ПДУ) и при превышении делается вывод о необходимости применения средств защиты. В рамках исследований время технологических процессов составляло 10 с, в соответствии с этим значение ПДУ для глаз  $E_{пду} = 0,32 \cdot 10^{-3}$  Вт/см<sup>2</sup>.

В представленных результатах прослеживаются различия уровней облученности при технологиях лазерной очистки, маркировки, роботизированной и ручной сварки, причем самый большой уровень зафиксирован при ручной сварке алюминиевого сплава типа АМг6. Для нержавеющей стали 12Х18Н10Т наибольшая интенсивность определена при технологии лазерной маркировки, что может

показаться неочевидным, поскольку данная технология менее энергозатратная по сравнению со сваркой. Одну из ключевых ролей в формировании ТСОС играет плотность мощности ЛИ. Значения плотности мощности при лазерной маркировке, очистке и при ручной сварке находятся в диапазоне  $1,6-7,9 \cdot 10^6$  Вт/см<sup>2</sup>. Для оценки влияния плотности мощности при роботизированной сварке намеренно был увеличен диаметр пятна ЛИ, что привело к уменьшению плотности мощности по сравнению с остальными процессами на два порядка ( $5 \cdot 10^4$  Вт/см<sup>2</sup>), при этом зафиксированы значения облученности на порядок ниже, чем во всех остальных исследуемых процессах. Еще одной особенностью сравнения ТСОС при разных ЛТП является пароплазменный факел. Процесс лазерной маркировки носит поверхностный характер обработки, что обуславливает отсутствие интенсивного пароплазменного факела и способствует наиболее активному отражению ЛИ. При уменьшении плотности мощности возникает интенсивное сопутствующее излучение, которое запирает в себе ЛИ, поэтому активного отражения ЛИ не происходит. Несмотря на существенную разницу в значениях облученности, все полученные результаты превышают ПДУ, что свидетельствует о необходимости применения средств защиты глаз от ЛИ [2, 8].

Сводные результаты измерений уровней энергетических характеристик сопутствующего УФ-излучения с указанием предельно допустимой интенсивности (ПДИ) при различных ЛТП обработки выбранных материалов приведены в табл. 2. Три главных факта, зафиксированных при всех

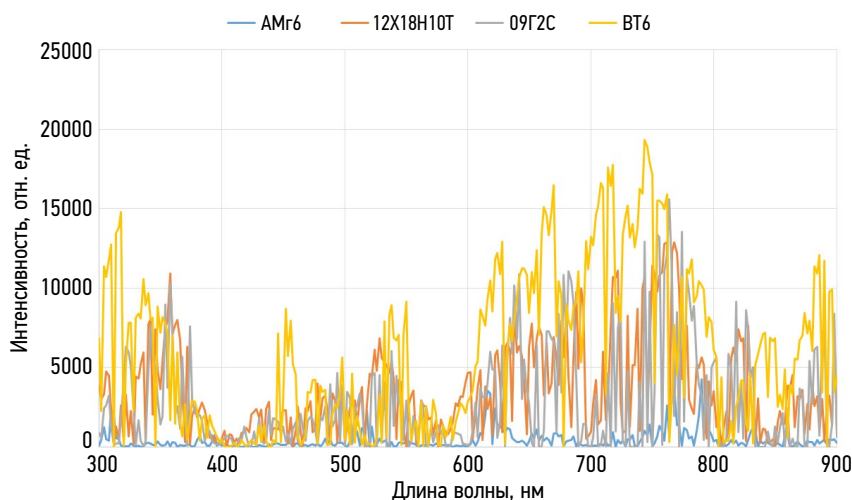


Рис. 3. Спектры лазерной плазмы образцов исследуемых материалов.  
Fig. 3. Laser plasma spectra of the studied samples.



Рис. 4. Фотография специализированного стенда измерения энергетических характеристик отраженного излучения.  
Fig. 4. Photo of a special bench used to measure reflected radiation energy parameters.

Таблица 1. Сводные результаты измерений максимальной облученности от лазерного излучения ( $E_{\max}$ , Вт/см<sup>2</sup>)Table 1. Summary measurements of maximum irradiance of laser radiation ( $E_{\max}$ , W/cm<sup>2</sup>)

Материал / Технология	Маркировка	Очистка	Ручная сварка	Роботизированная сварка
AMr6	$3,47 \cdot 10^{-3}$	$1,72 \cdot 10^{-3}$	$4,69 \cdot 10^{-3}$	$5,37 \cdot 10^{-4}$
BT6	–	–	$2,28 \cdot 10^{-3}$	$4,69 \cdot 10^{-4}$
12X18H10T	$3,03 \cdot 10^{-3}$	$1,62 \cdot 10^{-3}$	$1,84 \cdot 10^{-3}$	$3,47 \cdot 10^{-4}$
09Г2С	$7,84 \cdot 10^{-4}$	$2,49 \cdot 10^{-3}$	$1,19 \cdot 10^{-3}$	$4,66 \cdot 10^{-4}$

Таблица 2. Сводные результаты энергетической освещенности от УФ-излучения с указанием ПДИ

Table 2. Summary UV irradiance measurements with PDI

Марка материала	Энергетическая характеристика / технология	Маркировка	Очистка	Ручная сварка	Роботизированная сварка
ПДИ УФ-А, Вт/м <sup>2</sup>				<u>50</u>	
AMr6		0,0066	0,0064	0,0336	0,0632
BT6	УФ-А	–	–	0,189	1,3704
12X18H10T	Е, Вт/м <sup>2</sup>	0,0254	0,008	0,0078	0,057
09Г2С		0,0106	0,0068	0,005	0,0116
ПДИ УФ-В, Вт/м <sup>2</sup>				<u>0,05</u>	
AMr6		0,0078	0,0072	<b>0,0802</b>	<b>0,1134</b>
BT6	УФ-В	–	–	<b>0,0615</b>	<b>0,4276</b>
12X18H10T	Е, Вт/м <sup>2</sup>	0,0162	0,0094	0,0192	<b>0,12</b>
09Г2С		0,0052	0,0074	0,0176	0,0396
ПДИ УФ-С, Вт/м <sup>2</sup>				<u>0,001*</u>	
AMr6		<b>0,0834</b>	<b>0,1002</b>	<b>0,0088</b>	<b>0,12</b>
BT6	УФ-С	–	–	<b>0,5944</b>	<b>3,4326</b>
12X18H10T	Е, Вт/м <sup>2</sup>	<b>0,491</b>	<b>0,1586</b>	<b>0,0052</b>	<b>0,029</b>
09Г2С		<b>0,1602</b>	<b>0,0708</b>	<b>0,0056</b>	<b>0,011</b>

\* Период облучения до 5 минут, общая продолжительность воздействия за смену не более 60 минут.

\* The irradiation time is max. 5 minutes, the total shift exposure time is max. 60 minutes.

процессах: в УФ-А диапазоне превышений не выявлено; в УФ-С диапазоне все полученные значения превышают ПДИ; в диапазоне УФ-В излучения измеренные значения отличаются в зависимости от типа обрабатываемого материала и применяемой технологии [6].

Проведенными измерениями было показано, что ТСОС содержит уровни УФ-излучения во всех трех диапазонах (УФ-А, УФ-В, УФ-С), что подтвердило результаты спектрального анализа. Поскольку в УФ-В и УФ-С диапазонах зафиксированы превышения ПДИ, необходимо предусматривать средства защиты глаз и кожи от излучения и в УФ-диапазоне длин волн.

## ВЫВОДЫ

1. Характерными особенностями ТСОС при ЛТП являются различия спектров излучения и уровней их энергетических характеристик при обработке различных материалов.

2. На состав ТСОС влияет химический состав обрабатываемого материала и параметры режима работы.

3. Во всех исследованных процессах зафиксировано наличие УФ-излучения, в том числе превышающего ПДИ.

4. Все исследуемые технологические процессы сопровождаются отраженным лазерным излучением, превышающим ПДУ.

5. Наличие повышенных уровней энергетических характеристик ТСОС обуславливает необходимость использования средств защиты от излучений.

## ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ИНФОРМАЦИЯ

**Вклад авторов.** О.А. Крючина — проведение исследований и экспериментов, анализ результатов, написание текста рукописи; И.Н. Шиганов — редактирование текста рукописи, экспертная оценка, утверждение финальной версии. Все авторы одобрили рукопись (версию для публикации), а также согласились нести ответственность за все аспекты работы, гарантируя надлежащее рассмотрение и решение вопросов, связанных с точностью и добросовестностью любой её части.

**Источники финансирования.** Авторы заявляют об отсутствии внешнего финансирования при проведении исследования.

**Конфликт интересов.** Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией настоящей статьи.

**Генеративный искусственный интеллект.** При создании настоящей статьи технологии генеративного искусственного интеллекта не использовали.

## ADDITIONAL INFO

**Author contributions:** O.A. Kryuchina: investigation, formal analysis, writing—original draft; I.N. Shiganov: writing—review & editing. All the authors approved the version of the manuscript to be published and agreed

to be accountable for all aspects of the work, ensuring that questions related to the accuracy or integrity of any part of the work are appropriately investigated and resolved.

**Funding sources:** The study was not supported by any external sources.  
**Disclosure of interests:** The authors have no explicit or potential conflicts of interests associated with the publication of this article.

**Generative AI:** No generative artificial intelligence technologies were used to prepare this article.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Григорьянц А.Г. Шиганов И.Н., Мисюров А.И. Технологические процессы лазерной обработки. М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2006. ISBN: 5-7038-2701-9 EDN: WPEVRY
2. Крючина О.А. Безопасная эксплуатация лазерного технологического оборудования // РИТМ Машиностроения. 2022. № 10. С. 34–37.
3. Автоматизированный монохроматор-спектрограф M266. Дата обращения: 13.09.2024. Режим доступа: Монохроматор-спектрограф автоматизированный Модель M266, купить спектрограф M266 (solar-laser.com).
4. Светофильтры из цветного стекла. Дата обращения: 13.09.2024. Режим доступа: <https://oltech.ru/catalog/svetofiltry-iz-tsvetnogo-stekla/>
5. Крючина О.А., Шиганов И.Н. Энергетические характеристики отраженного излучения при лазерных технологических процессах. В кн.: Научные технологии в машиностроении: XV Международная научно-техническая конференция (Москва, 1–3 ноября 2023 года): материалы конференции: в 2 т. М.: МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2024. Т. 2. С. 216–219. EDN: GYSTBA

6. Доклад О.А. Крючиной «Измерение энергетических характеристик отраженного излучения при лазерных технологических процессах». Научно-практическая конференция рабочей группы № 3 технологической платформы «Фотоника-2023» «Лазерная макрообработка промышленных материалов и аддитивные технологии». Дата обращения: 13.09.2024. Режим доступа: <https://www.youtube.com/watch?v=nbDFQt3vaTw>
7. Крючина О.А., Шиганов И.Н., Садовников И.Э. Совершенствование методики контроля отраженного и рассеянного излучения при лазерных технологических процессах // Технология машиностроения. 2021. № 1. С. 63–67. EDN: HXLLQQ
8. Крючина О.А., Шиганов И.Н., Садовников И.Э. Особенности энергетических характеристик световой технологической среды при лазерной и лазерно-дуговой обработке металлов волоконными лазерами // Сварочное производство. 2024. № 1. С. 29–36. EDN: BCWXLL

## REFERENCES

1. Grigor'yanc AG, Shiganov IN, Misyurov AI. *Laser processing technologies*. Moscow: MG TU im NE Bauman; 2006. (In Russ.) ISBN: 5-7038-2701-9 EDN: WPEVRY
2. Kryuchina OA. Safe operation of laser technological equipment. *RITM Mashinostroeniya*. 2022;10:34–37. (In Russ.)
3. Automated monochromator-spectrograph M266. Accessed: 13.09.2024. Available from: Monohromator-spektrograf avtomatizirovannyj Model' M266, kupit' spektrograf M266 (solar-laser.com)
4. Colored glass filters. Accessed: 13.09.2024. Available from: <https://oltech.ru/catalog/svetofiltry-iz-tsvetnogo-stekla/> (data obrashcheniya: 13.09.2024).
5. Kryuchina OA, Shiganov IN. Energy characteristics of reflected radiation in laser technological processes. In: High-tech in mechanical engineering: XV International scientific-technical conference (Moscow, November 1–3, 2023): conference proceedings: in 2 vol. Moscow: MG TU im NE Bauman; 2024;2:216–219. (In Russ.) EDN: GYSTBA

6. Scientific and practical conference of the working group № 3 of the technological platform «Fotonika-2023» «Laser macroprocessing of industrial materials and additive technologies». Presentation by O.A. Kryuchinoy «Measuring the energetic characteristics of reflected radiation in laser technological processes». Accessed: 13.09.2024. Available from: <https://www.youtube.com/watch?v=nbDFQt3vaTw>
7. Kryuchina OA, Shiganov IN, Sadovnikov IE. Improving the methodology for monitoring reflected and scattered radiation in laser technological processes. *Tekhnologiya mashinostroeniya*. 2021;1:63–67. (In Russ.) EDN: HXLLQQ
8. Kryuchina OA, Shiganov IN, Sadovnikov IE. Features of energy characteristics of the light technological environment during laser and laser-arc processing of metals with fiber lasers. *Svarochnoe proizvodstvo*. 2024;1:29–36. (In Russ.) EDN: BCWXLL

## ОБ АВТОРАХ

**\*Ольга Алексеевна Крючина**, начальник отдела сертификации, аттестации и стандартизации, ООО «ВПГ Лазеруан»; адрес: 141190, Фрязино, площадь академика Б.А. Введенского, д. 3 стр. 5; ORCID: 0000-0001-7592-0790; eLibrary SPIN: 6825-1469; e-mail: oKryuchina@vpglaserone.ru

**Игорь Николаевич Шиганов**, д-р техн. наук, профессор кафедры лазерные технологии в машиностроении, Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана; eLibrary SPIN: 7316-1459; e-mail: inshig@bmstu.ru

## AUTHORS' INFO

**\*Olga A. Kryuchina**, Head of the Certification, Attestation and Standardization Department, LLC NTO IRE-Polus; address: 141190, Fryazino, Academician B.A. Vvedensky Square, 3 bld. 5; ORCID: 0000-0001-7592-0790; eLibrary SPIN: 6825-1469; e-mail: oKryuchina@ntoire-polus.ru

**Igor N. Shiganov**, Dr. Sci. (Engineering), Professor, Department of Laser Technologies in Mechanical Engineering, Moscow State Technical University named after Bauman; eLibrary SPIN: 7316-1459; e-mail: inshig@bmstu.ru

\* Автор, ответственный за переписку / Corresponding author

Оригинальное исследование

УДК 621.791.92

DOI: [https://doi.org/10.52899/24141437\\_2025\\_02\\_259](https://doi.org/10.52899/24141437_2025_02_259)

EDN: BOFWQZ

# Разработка технологического процесса ремонта рабочих лопаток первой ступени турбины высокого давления газотурбинного двигателя ДР-59Л методом лазерной порошковой наплавки

С.В. Тюков, Г.Г. Задыкян, Д.В. Мукин, Р.В. Мендагалиев, Р.С. Корсмик

Санкт-Петербургский государственный морской технический университет, Санкт-Петербург, Россия

## АННОТАЦИЯ

**Актуальность.** Современный авиационный газотурбинный двигатель — это передовой технологический комплекс, состоящий из компрессора, камеры сгорания, турбины, сопла и других модулей. Среди них важную роль для надежности работы газотурбинного двигателя играет осевой компрессор, который состоит из многоступенчатых лопаток ротора и статора. И все эти компоненты подвергаются воздействию статических, динамических и циклических нагрузок, из-за чего возникают усталостные трещины, термические напряжения и механические повреждения. Чтобы увеличить срок службы газотурбинных двигателей и снизить затраты на его обслуживание, применяются технологии восстановления изношенных или поврежденных поверхностей рабочих лопаток.

**Цель работы** — восстановление изношенных поверхностей серии рабочих лопаток турбины высокого давления ДР-59Л методом лазерной порошковой наплавки.

**Материалы и методы.** Перед выполнением ремонта рабочих лопаток предварительно была произведена апробация диапазона технологических параметров лазерной наплавки для получения бездефектной структуры на образце-свидетеле. В качестве присадочного материала выступал металлический порошок кобальтового сплава Stellite-21. Для оценки структуры и механических свойств наплавленных образцов были проведены металлографические исследования и механические испытания.

**Результаты.** Посредством моделирования процесса восстановления пера рабочей лопатки определен рабочий режим лазерной порошковой наплавки. В ходе капиллярного метода контроля восстановленных поверхностей рабочих лопаток не были выявлены дефекты. Результаты испытания на одноосное растяжение восстановленного пера рабочей лопатки показали повышенный предел прочности и относительного удлинения.

**Заключение.** С применением технологии лазерной порошковой наплавки удалось восстановить изношенные поверхности серии рабочих лопаток турбины высокого давления ДР-59Л, тем самым увеличив жизненный цикл изделий силовой установки.

**Ключевые слова:** лазерная порошковая наплавка; рабочая лопатка; турбина высокого давления; ремонт компонентов ГТД; ЧС-70.

## Как цитировать

Тюков С.В., Задыкян Г.Г., Мукин Д.В., Мендагалиев Р.В., Корсмик Р.С. Разработка технологического процесса ремонта рабочих лопаток первой ступени турбины высокого давления газотурбинного двигателя ДР-59Л методом лазерной порошковой наплавки // Труды Санкт-Петербургского государственного морского технического университета. 2025. Т. 4, № 2. С. 259–270. DOI: 10.52899/24141437\_2025\_02\_259 EDN: BOFWQZ



Original study article

DOI: [https://doi.org/10.52899/24141437\\_2025\\_02\\_259](https://doi.org/10.52899/24141437_2025_02_259)

EDN: BOFWQZ

# Development of Laser Cladding Repair Process for First Stage Blading of High-Pressure Turbine for DR-59L Gas Turbine Engine

Stepan V. Tyukov, Grigory G. Zadykyan, Dmitriy V. Mukin, Ruslan V. Mendagaliev, Rudolf S. Korsmik

Saint Petersburg State Marine Technical University, Saint Petersburg, Russia

## ABSTRACT

**BACKGROUND:** A state-of-the-art aircraft gas turbine engine is an advanced technology consisting of a compressor, combustion chamber, turbine, nozzle, and other components. It includes the axial compressor with multistage rotor and stator blades important for the reliable operation of the gas turbine engine. All these components are subject to static, dynamic, and cyclic loads causing fatigue cracking, thermally induced stress, and mechanical damage. To increase the service life of gas turbine engines and reduce maintenance costs, technologies are used to restore worn or damaged moving blade surfaces.

**AIM:** To restore worn surfaces of moving blades of DR-59L high-pressure turbine by laser cladding.

**MATERIALS AND METHODS:** Prior to repairing the blades, we tested a range of laser cladding parameters on a check test piece to determine a defect-free structure. Stellite-21 cobalt alloy powder was used as a filler. To evaluate the structure and mechanical properties of the claded test pieces, we conducted metallographic studies and mechanical tests.

**RESULTS:** By modeling the blade airfoil restoration process, we determined the operational conditions of the laser cladding process. No defects were detected during the capillary test of the restored surfaces. The uniaxial tensile test of the restored blade airfoil showed increased tensile strength and elongation.

**CONCLUSIONS:** Laser cladding technology allowed to restore the worn surfaces of moving blades of DR-59L high-pressure turbine; thereby increasing the service life of the engine unit.

**Keywords:** laser cladding; moving blade; high-pressure turbine; repair of gas turbine engine components; CS70.

## To cite this article

Tyukov SV, Zadykyan GG, Mukin DV, Mendagaliev RV, Korsmik RS. Development of Laser Cladding Repair Process for First Stage Blading of High-Pressure Turbine for DR-59L Gas Turbine Engine. *Transactions of the Saint Petersburg State Marine Technical University*. 2025;4(2):259–270. DOI: 10.52899/24141437\_2025\_02\_259 EDN: BOFWQZ

## ВВЕДЕНИЕ

С быстрым ростом применения лазеров и снижением стоимости лазерных систем лазерная обработка материалов приобретает все большее значение в различных отраслях промышленности. Автомобильная, аэрокосмическая, военно-морская, оборонная и многие другие отрасли широко применяют лазерные технологии для сварки, резки и закалки. Среди применений лазерных технологий лазерная порошковая наплавка получила значительное внимание в последние годы благодаря своему разностороннему потенциалу для обработки материалов, таких как нанесение металлических покрытий, ремонт дорогостоящих компонентов, создание прототипов и даже мелкосерийное производство [1].

Газотурбинный двигатель (ГТД) — это передовой технологический комплекс, состоящий из осевого компрессора, камеры сгорания, турбины, сопла и других модулей, который преобразует энергию газа в механическую работу. Каждая секция осевого компрессора имеет набор лопаток ротора и статора. Рабочие лопатки газотурбинных двигателей представляют собой детали с наивысшим показателем прочности, подвергающиеся наиболее интенсивным условиям эксплуатации: высокие скорости при различных температурах, высокое трение с воздухом и с различным мусором, статические, динамические и циклические нагрузки, из-за чего возникают усталостные трещины, термические напряжения и механические повреждения. Трещины в лопатках могут образовываться вследствие вибрации в различных местах, однако наиболее вероятное возникновение трещин в местах концентрации напряжений, например, у корня лопаток в хвостовой части, на входных и выходных кромках лопаток. Все эти факторы сокращают срок эксплуатации рабочих лопаток и увеличивают вероятность их преждевременного повреждения с существенными проблемами безопасности и финансовыми потерями. Поврежденная или изношенная лопатка отправляется на металлолом или на ремонт, но процесс ремонта имеет ряд особых характеристик, обусловленных используемыми материалами и требованиями к качеству [2, 3].

Восстановление рабочих лопаток газотурбинного двигателя требует особых условий, таких как низкое теплоотделение, локальное и точное добавление материала и сплавление с трудноплавляемыми жаропрочными сплавами. В настоящее время лазерная порошковая наплавка хорошо известна как лучшее решение для восстановления поврежденных лопаток, поскольку технология позволяет выполнить все специфические условия, предъявляемые к восстановлению компонентов газотурбинного двигателя. Связи с этим проводятся многочисленные исследования с целью улучшения процесса восстановления реактивного двигателя путем разработки новых присадочных материалов, оптимизации параметров и автоматизации процесса [4–6].

Обработка жаропрочных материалов на сегодняшний день связана с высокими затратами. Поэтому ремонт и восстановление компонентов становятся первоочередными задачами как для производителей, так и для операторов газовых турбин. Чтобы избежать дорогостоящей замены всей лопатки, проводится процесс ремонта, в большинстве случаев состоящий из нескольких этапов работ: выборка поврежденных участков, восстановление геометрии, механическая обработка и термообработка [7].

Авторы исследования [8] реализовали метод лазерной порошковой наплавки для восстановительного ремонта геометрии пера лопатки турбины, изготовленной из жаропрочного сплава. Для разработки стратегии наплавки и наилучшего формирования наплавленного слоя на перо лопатки авторы производили компьютерное моделирование процесса с измерением температурных полей в основном металле лопатки. Помимо этого, был подобран рабочий режим наплавки, где в качестве присадочного материала выступал сплав Inconel 718, после чего была отработана геометрия пера на подложке. В конечном итоге авторам удалось восстановить перо изношенной лопатки с небольшим припуском.

Также авторы работы [9] продемонстрировали возможность ремонта пера лопатки турбины, изготовленной из жаропрочного сплава, методом лазерной порошковой наплавки. В качестве присадочного материала использовался металлический порошок сплава Stellite-6. Было выявлено, что для того, чтобы свести деформацию лопатки к минимуму необходимо свести к минимуму потребление тепла, используя низкую мощность лазера и избегать накопления тепла на кромках, помимо этого толщина наплавленного слоя должна быть минимальной. При изменении параметров наплавки, таких как расход порошка, мощность лазера и скорость наплавки, в материале может образоваться пористая структура, что снижает его износостойкость и может привести к дефектам на поверхности. Это связано с недостаточной энергией для полного расплавления наплавленного слоя из-за большого отношения высоты валика к его ширине.

## МЕТОДИКА, МАТЕРИАЛЫ И ОБОРУДОВАНИЕ

### Объект исследования

Объектом исследования в данной работе является рабочая лопатка турбины высокого давления газотурбинного двигателя ДР-59Л, изготовленная из сплава ЧС-70. Химический состав сплава ЧС-70 представлен в табл. 1.

Для оценки износа рабочих лопаток турбины высокого давления был проведен измерительный контроль поверхностей, которые подвергаются износу, с последующим сравнением размеров 3D-модели рабочей лопатки в программном обеспечении SolidWorks 2020. Размеры

Таблица 1. Химический состав сплава ЧС-70

Table 1. Chemical composition of CS70 alloy

Марка сплава	Содержание элементов, масс. %								
	Ni	Co	Al	Ti	Mo	W	C	Cr	Nb
ЧС-70	Осн.	10,5	2,8	4,6	2,0	5,0	0,08	15,5	0,3

Таблица 2. Химический состав сплава Stellite-21

Table 2. Chemical composition of Stellite-21 alloy

Марка сплава	Содержание элементов, масс. %						
	Ni	Co	Fe	Mo	C	Cr	Si
Stellite-21	3,0	Осн.	1,5	5,5	0,25	27,0	1,0

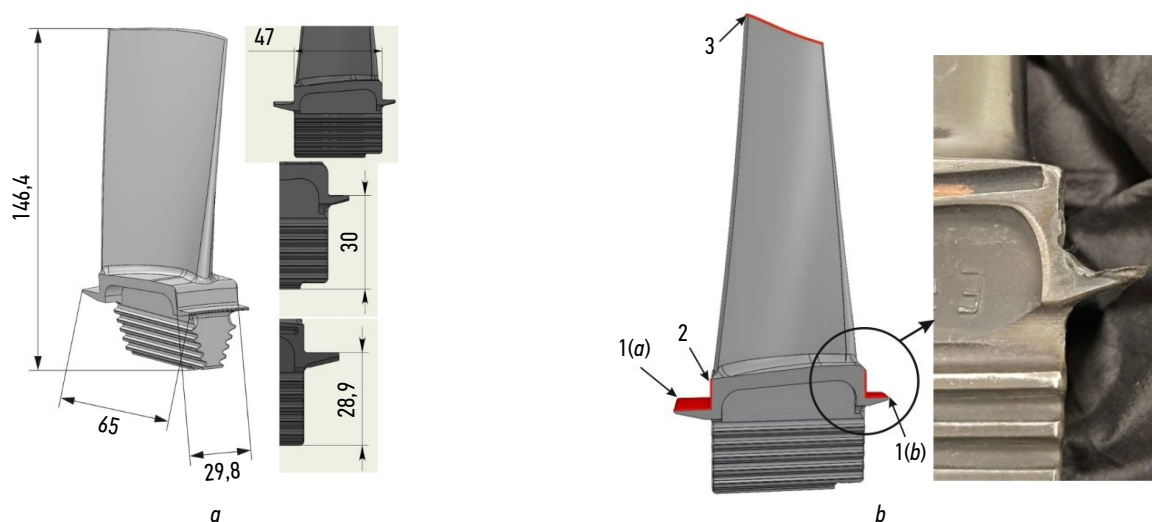


Рис. 1. Внешний вид рабочей лопатки ДР-59Л: *a* — размеры рабочей лопатки; *b* — изношенные поверхности рабочей лопатки.  
Fig. 1. View of DR-59L moving blade: *a*, blade dimensions; *b*, worn blade surfaces.

рабочей лопатки приведены на рис. 1, *a* в миллиметрах. Сравнив полученные результаты измерений с исходной 3D-моделью рабочей лопатки, было выявлено, что износу подверглись: торцы замка (рис. 1, *a*, *b*), уплотнительные гребешки (2), а также перо (3), как указано на рис. 1, *b* в виде красных областей.

### Описание тепловой модели наплавки пера рабочей лопатки

Для определения температурного состояния поверхности пера рабочей лопатки непосредственно в процессе наплавки необходимо решить задачу нестационарной теплопроводности в условиях действия концентрированного источника тепла. Уравнение, описывающее распространение тепла в трехмерном пространстве, можно записать в следующем виде:

$$\rho(T)C(T)\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x}\left(\lambda(T)\frac{\partial T}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(\lambda(T)\frac{\partial T}{\partial y}\right) + \frac{\partial}{\partial z}\left(\lambda(T)\frac{\partial T}{\partial z}\right), \quad (1)$$

где  $\rho$  — плотность;  $C$  — теплоемкость;  $\frac{\partial T}{\partial t}$  — скорость изменения температуры;  $\lambda$  — коэффициент теплопроводности;  $\frac{\partial T}{\partial x}, \frac{\partial T}{\partial y}, \frac{\partial T}{\partial z}$  — градиент температуры.

Граничные условия на лицевой поверхности расчетной области:

$$-\lambda \frac{\partial T}{\partial n} = q_L(x, y), \quad (2)$$

где  $\frac{\partial T}{\partial n}$  — температурный градиент;  $q_L$  — плотность мощности.

На остальных поверхностях задается условие конвективного теплообмена с окружающей средой ( $T_0$ ):

$$-\lambda \frac{\partial T}{\partial n} = h_c(T - T_0), \quad (3)$$

где  $h_c$  — коэффициент теплообмена.

Решение уравнения теплопроводности (1) с граничными условиями (2), (3) для геометрии, соответствующей рабочей лопатке, было получено методом конечных элементов и реализовано средствами программного пакета Comsol Multiphysics.

### Используемый материал для наплавки рабочей лопатки

В табл. 2 приведен химический состав сплава Stellite-21, который выступает в роли материала для

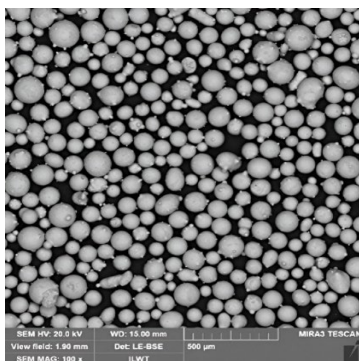


Рис. 2. Морфология порошка Stellite-21.  
Fig. 2. Stellite-21 powder morphology.

восстановительной наплавки. Форма частиц порошка сферичная, фракция составляет 40–150 мкм, морфология металлического порошка представлена на рис. 2.

### Оборудование лазерной порошковой наплавки и постановка эксперимента

Для восстановления изношенных рабочих лопаток газотурбинного двигателя использовалась установка прямого лазерного выращивания ИЛИСТ-М, представленная на рис. 3, *а*. Комплекс представляет собой герметичную кабину, в которой расположен одноосевой позиционер и шестиосевой промышленный робот Fanuc M10iD/12. Робот оснащен лазерной головкой (рис. 3, *б*), в качестве источника излучения используется встраиваемый иттербиевый волоконный лазер IPG YLR-1500-U.

Для определения рабочего режима наплавки была проведена серия экспериментальных исследований

Таблица 3. Диапазон варьируемых технологических параметров  
Table 3. Range of process variables

Параметр	Мощность (P), Вт	Скорость (V), мм/с	Расход порошка (G), г/мин	Диаметр пятна (D), мм
Диапазон значений	200–400	2–5	2–7	1

с варьированием технологических параметров в конкретном диапазоне, который приведен в табл. 3.

С варьированием параметров обработки была произведена наплавка технологических проб. В качестве материала подложек выступал сплав ЧС-70, в качестве присадочного материала выступал сплав Stellite-21. Сжатая газопорошковая струя подается коаксиально лазерному лучу с помощью струйного сопла, в качестве транспортного газа выступает аргон.

После этого на рабочем режиме наплавки была произведена наплавка пера на образце-свидетеле. Образец-свидетель подвергался неразрушающему контролю, металлографическому анализу, испытанию на растяжение и определению микротвердости.

### Исследование макроструктуры образцов

Наплавленные образцы подвергались визуальному осмотру (рис. 4) на предмет наличия/отсутствия явных дефектов (трещин, неустойчивых областей). По окончании визуального контроля осуществлялась пробоподготовка наплавленных образцов с целью дальнейшего металлографического исследования. Полученные в рамках



*а*



*б*

Рис. 3. Используемое оборудование для лазерной порошковой наплавки: *а* — установка прямого лазерного выращивания ИЛИСТ-М; *б* — технологический инструмент.

Fig. 3. Laser cladding equipment: *a*, laser direct deposition unit ILIST-M; *b*, process tool.



Рис. 4. Внешний вид технологической пробы.  
Fig. 4. View of a process sample.

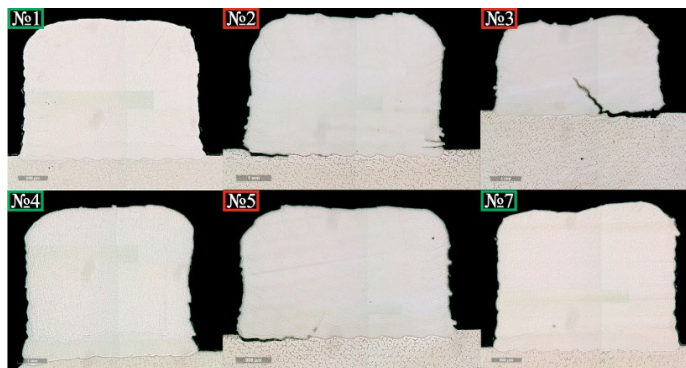


Рис. 5. Поперечное сечение технологических проб.  
Fig. 5. Cross-section of process samples.

экспериментальных исследований образцы исследовались с помощью инвертированного металлографического микроскопа Leica DMi8A и сканирующего электронного микроскопа TESCAN MIRA 3. Макрошлифы технологических проб на разных режимах обработки представлены на рис. 5.

Как видно из рис. 5, образцы на режимах обработки № 1, № 4 и № 7 не имеют такие дефекты как трещины и несплавления, также все 3 режима наплавки показали устойчивость формирования слоев по высоте. Помимо этого, на режиме № 1 можно наблюдать небольшое скопление мелких пор в пределах допустимого.

### Оборудование для испытаний на механические свойства

Для определения механических свойств образца-свидетеля, который представлял из себя восстановленное перо рабочей лопатки, были проведены испытания на одноосное растяжение. Испытания проводились на универсальной испытательной машине Shimadzu AG-50kNX. Схема вырезки образцов представлена на рис. 6. Для измерения микротвердости был использован микротвердомер Future-Tech FM-310. Расстояние между отпечатками измерений составляло 150 мкм, измерения проводились по методу Виккерса с нагрузкой в 300 г.



Рис. 6. Схема вырезки образцов для механического испытания.  
Fig. 6. Sample cutting diagram for mechanical tests.

### Стратегии наплавки изношенных поверхностей рабочей лопатки

Для наплавки торца пера рабочей лопатки необходимо закладывать припуск наплавленного металла на дальнейшую механическую обработку 0,5 мм. Поскольку диаметр пятна равен 1 мм, необходимо производить наплавку таким образом, чтобы центр пятна был на кромке пера, чтобы получить необходимый припуск наплавленного металла. В качестве стратегии наплавки пера рабочей лопатки была составлена следующая последовательность формирования валиков, которая отображена на рис. 7, где стрелками указано направление перемещения технологического инструмента. Смещение между валиками ( $\Delta X$ ) составляет 2/3 от ширины валика.

Первый валик формируется по кромке пера рабочей лопатки, как упоминалось выше, начиная с выходной кромки заканчивая также в области выходной кромки пера. Старт наплавки второго валика располагается по центру выходной кромки и повторяет траекторию движения 1-го

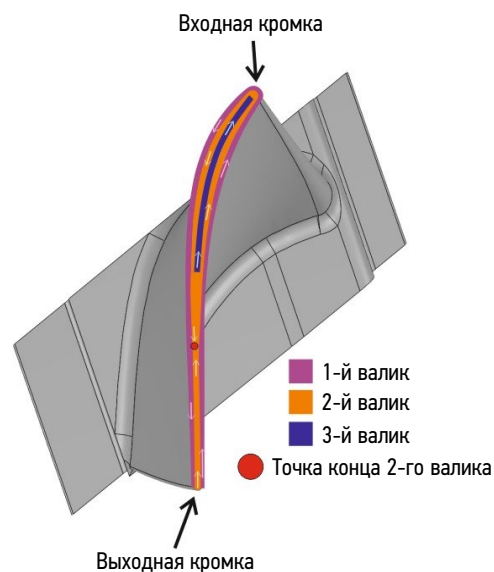


Рис. 7. Стратегия наплавки пера рабочей лопатки.  
Fig. 7. Blade airfoil deposition strategy.

валика, однако стоит, заметить, что наплавка завершается в тот момент, когда расстояние между центрами сформированных соседних валиками меньше значения  $\Delta X$  (красная точка на рис. 7), тем самым замыкая траекторию 2-го валика. Завершающий третий валик начинает и заканчивает свое формирование в той области, где 2-й валик не обеспечивает перекрытие наплавленного металла.

Для наплавки торцов замка и уплотнительных гребешков рабочей лопатки, необходимо сперва произвести наплавку галтели, как указано на рис. 8, *a*, где цифрами обозначен порядок наплавки валиков, т.е. сперва формируется центральный валик, а затем соседние валики, наплавка производится в 3 слоя. После наплавки галтели производится наплавка торцов замка и уплотнительных гребешков, как представлено на рис. 8, *b*.

При наплавке торца замка технологический инструмент наклоняется на 30 градусов, и начало наплавки осуществляется с границы крайнего валика, полученного на предыдущем этапе. Наплавка осуществляется до конца торца в 2 слоя. Восстановление уплотнительного гребешка осуществляется аналогично.

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

### Результаты моделирования наплавки пера рабочей лопатки

Поскольку режимы наплавки № 1, № 4 и № 7 имеют одинаковые технологические параметры, за исключением мощности, численное моделирование сводится к исследованию влияния мощности лазерного излучения на температурное поле лопатки в области наплавки. Соответственно, параметры мощности лазерного излучения варьировались в пределах от 200 Вт до 300 Вт с шагом 50 Вт, при постоянной скорости перемещения рабочего инструмента 3 мм/с, размера пятна лазерного излучения 1 мм, расхода присадочного материала 2 г/мин. Траектория движения точечного источника тепла в модели соответствует стратегии наплавки пера рабочей лопатки. Фрагменты модели наплавки пера рабочей лопатки в виде сверху представлены на рис. 9 с разными промежутками времени, с установленной термопарой, точка А на рис. 10.

Как говорилось ранее, сложная геометрия пера рабочей лопатки приводит к тому, что размеры ванны

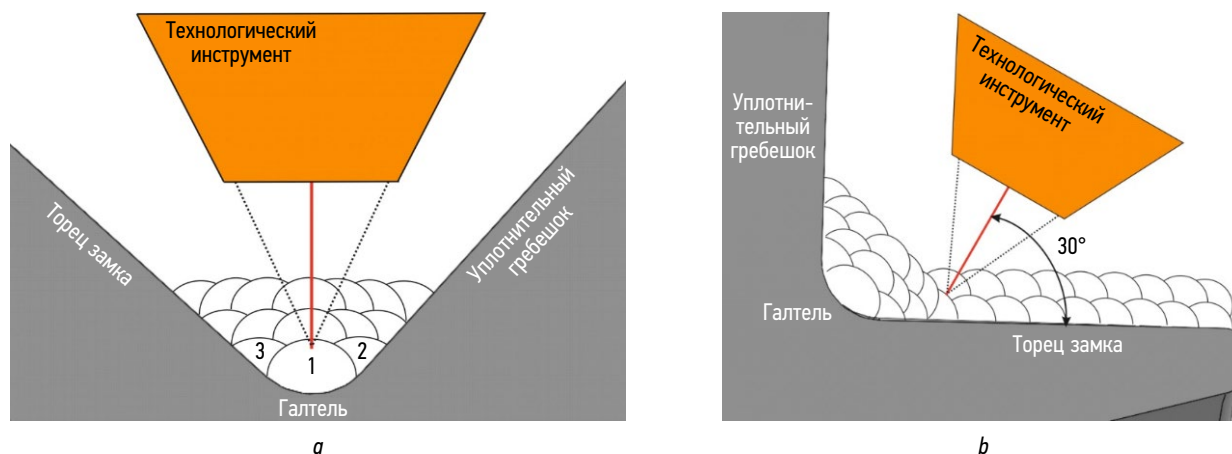


Рис. 8. Схема наплавки изношенных поверхностей: *a* — схема наплавки галтели; *b* — схема наплавки торца замка.

Fig. 8. Worn surface deposition diagram: *a*, fillet deposition diagram; *b*, blade root deposition diagram.

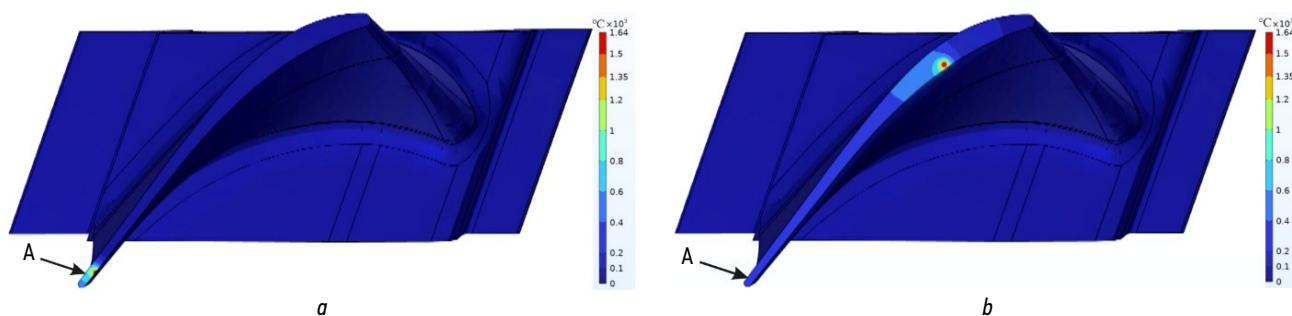


Рис. 9. Модель наплавки пера рабочей лопатки при мощности 300 Вт: *a* — наплавка в момент времени 2 секунды; *b* — наплавка в момент времени 73 секунды; А — точка установки термопары.

Fig. 9. Deposition model of the blade airfoil at 300 W: *a*, deposition at 2 seconds; *b*, deposition at 73 seconds; A, thermocouple installation point.

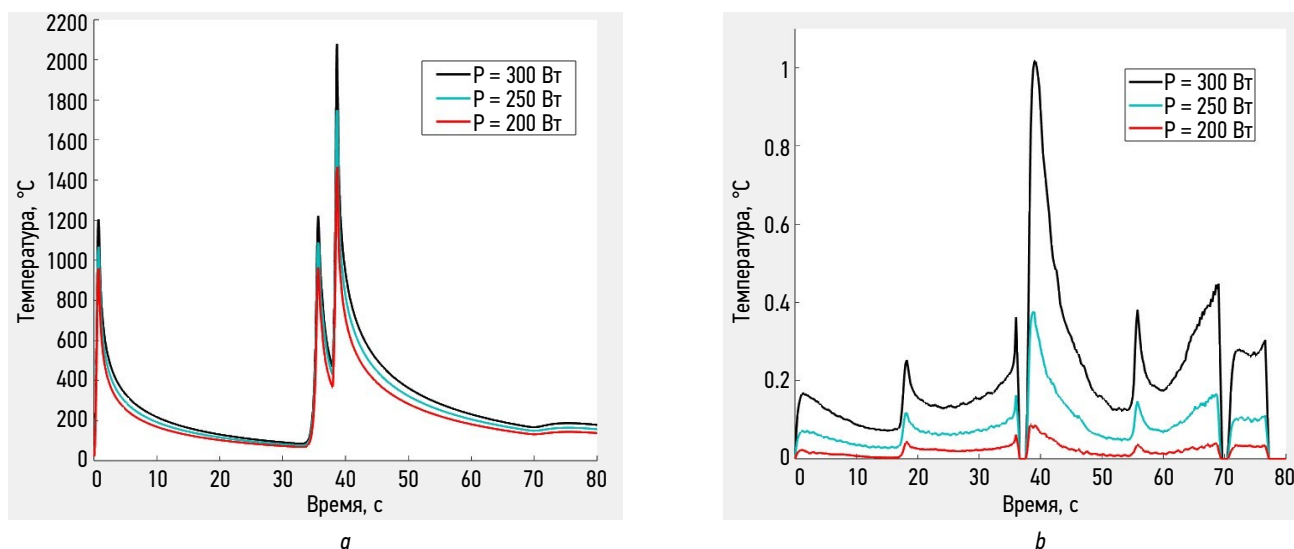


Рис. 10. Результаты моделирования: *a* — термический цикл в точке А при различных значениях мощности лазерного излучения; *b* — зависимость объема ванны расплава при различных значениях мощности лазерного излучения.

Fig. 10. Modeling outcome: *a*, thermal cycle at point A at different laser power; *b*, molten pool volume at different laser power.

расплава, определяемые температурным полем, зависят от пространственного положения ванны на поверхности пера рабочей лопатки. Таким образом, наибольший интерес вызывает область с наименьшей толщиной, подвергающаяся вследствие этого наибольшему нагреву, что соответствует выходной кромке пера рабочей лопатки.

На рис. 10, *a* представлены термические циклы в точке А, которая отображена на рис. 9, в процессе наплавки при различных мощностях лазерного излучения. На рис. 10, *b* приведено сравнение размеров ванны расплава также при варьировании мощности.

Как и следовало ожидать, с увеличением мощности лазерного излучения растут значения температур и размеры ванны расплава соответственно. Однако, согласно результатам численного анализа, при мощности 200 Вт на первом валике объем ванны принимает значения близкие к 0, что будет означать отсутствие сплавления присадочного и основного материалов. Максимальный объем ванны наблюдается в начале второго валика, когда лазерный луч проходит через область выходной кромки пера, при этом в данной зоне температура остается все еще высокой после предыдущего валика. При мощности 300 Вт зона, температура которой превышает температуру плавления, формируется по всей ширине лицевой поверхности лопатки в области выходной кромки пера, а объем жидкой фазы становится чрезмерно большим и превышает в три раза объем ванны при мощности

200 Вт. При такой мощности излучения (300 Вт) велика вероятность возникновения прожога выходной кромки пера рабочей лопатки. Таким образом результаты численного анализа показали, что мощность 200 Вт является недостаточной по причине отсутствия или недостаточного сплавления присадочного материала, а мощность 300 Вт является избыточной, поскольку наблюдается чрезмерный рост объема зоны с температурой, превышающей температуру плавления материала. Поэтому для наплавки пера, торца замка и уплотнительного гребешка рабочей лопатки была выбрана мощность 250 Вт, что соответствует режиму № 4, который приведен в табл. 4, где  $\Delta Z$  — смещение по высоте.

### Результаты анализа макрошлифов образца-свидетеля

В результате металлографического исследования были получены макрошлифы образца-свидетеля в продольном и поперечном сечении, представленные на рис. 11.

Как видно из рис. 11, в структуре наплавленного образца не наблюдаются внутренние дефекты, такие как трещины и несплавления. Однако наблюдаются единичные поры на границах валиков в пределах допустимого.

### Механические исследования

После получения металлографии были проведены испытания измерения микротвердости по длине образца. По результатам измерения микротвердости, представленных в табл. 5, был построен график изменения микротвердости, представленный на рис. 12.

Из результатов измерения микротвердости по длине образца видно, что микротвердость основного

Таблица 4. Рабочий режим наплавки рабочих лопаток

Table 4. Operational conditions of the blade deposition process

<i>P</i> , Вт	<i>V</i> , мм/с	<i>G</i> , г/мин	$\Delta X$ , мм	$\Delta Z$ , мм	<i>D</i> , мм
250	3	2	0,66	0,4	1

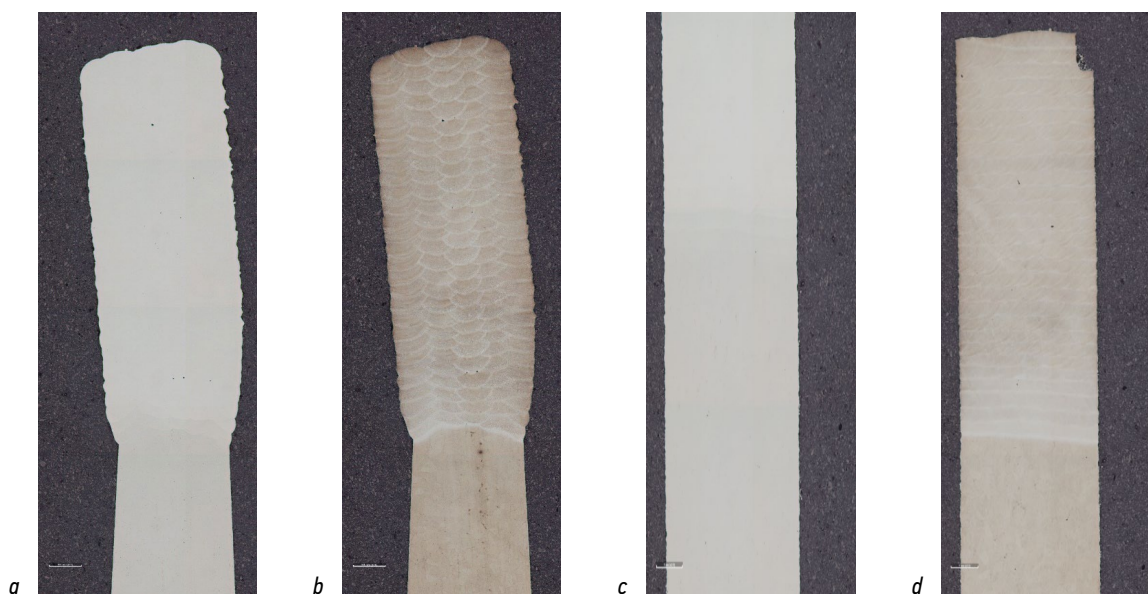


Рис. 11. Поперечное и продольное сечение образца-свидетеля: *a* — до травления; *b* — после травления; *c* — до травления; *d* — после травления.  
Fig. 11. Cross-section and longitudinal section of the check test piece: *a*, before etching; *b*, after etching; *c*, before etching; *d*, after etching.

Таблица 5. Результаты измерений микротвердости

Table 5. Microindentation hardness measurements

Сплав	Номер измерения, микротвердость, HV									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
ЧС-70	428	433	447	448	441	398	349	339	350	372
Stellite-21	415	429	425	429	428	415	441	432	434	427

Таблица 6. Механические свойства сплавов Stellite-21, ЧС-70 и образцов № 1, № 2

Table 6. Mechanical properties of Stellite-21, CS70, and test pieces 1 and 2

Сплав/№ образца	Предел текучести, $\sigma_{0,2}$ , МПа	Предел прочности, $\sigma_B$ , МПа	Относительное удлинение, $\delta$ , %
ЧС-70	750	900	3,0
Stellite-21	550	724	9,0
1	692	995	6,7
2	743	982	4,5

и присадочного материала схожи. Однако в переходной зоне наблюдается небольшой спад микротвердости, что соответствует области перемешивания сплавов и образования периферийной структуры.

В результате проведения механического испытания на одноосное растяжение был определен предел прочности, предел текучести и относительное удлинение образцов (№ 1, № 2), образцы при этом разрушились в зоне присадочного материала. Механические свойства сплавов Stellite-21 и ЧС-70 согласно стандартам [10, 11] и полученных образцов (№ 1, № 2) приведены в табл. 6.

Результаты испытаний показывают повышенную прочность, достаточно хорошее относительное удлинение, в особенности у первого образца. Предел текучести близок к значениям сплава ЧС-70, изготовленного традиционными методами.

## Результат ремонта рабочих лопаток

Результат ремонта рабочих лопаток представлен на рис. 13.

После наплавки изношенных поверхностей рабочих лопаток было проведено измерение восстановленной геометрии. В результате проведенных измерений было выявлено, что все размеры отремонтированных сегментов рабочих лопаток соответствуют размерам 3D-модели лопатки с учетом дополнительного припуска в 1 мм на механическую обработку. Результаты измерений восстановленной геометрии представлены в табл. 7.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе проведения работы был разработан технологический процесс восстановления рабочих лопаток турбины



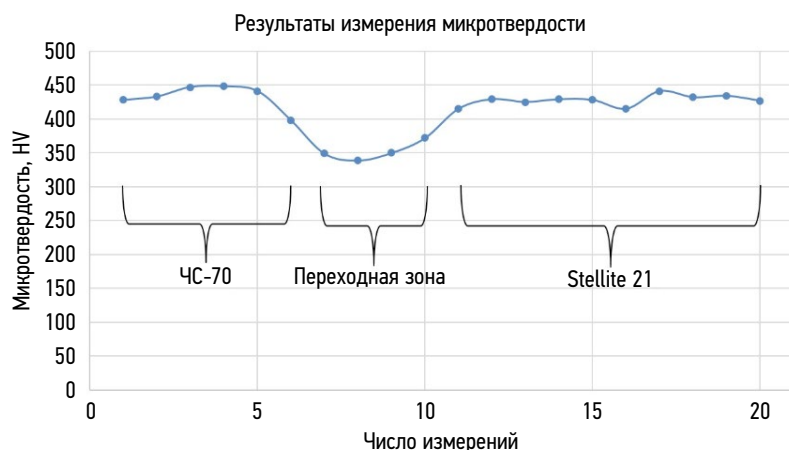


Рис. 12. График результатов измерения микротвердости.  
Fig. 12. Microindentation hardness graph.

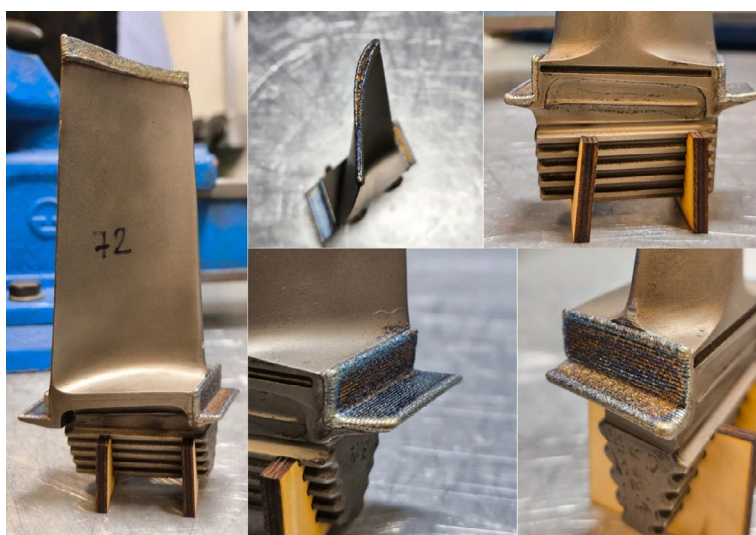


Рис. 13. Внешний вид восстановленной рабочей лопатки.  
Fig. 13. View of the restored blade.

Таблица 7. Результаты измерений восстановленной геометрии рабочих лопаток

Table 7. Physical dimensions of the restored blades

Поверхность	Перо, мм	Торец замка (a), мм	Торец замка (b), мм	Уплотнительный гребешок, мм
Значение	147,5–148	30–30,4	31,1–31,5	48,1–48,5

высокого давления ДР-59Л газотурбинного двигателя методом лазерной наплавки.

Определены режимы процесса лазерной наплавки, обеспечивающие бездефектную структуру и стабильную геометрию наплавляемых технологических проб. Были разработаны стратегии наплавки изношенных поверхностей рабочих лопаток, куда входит наплавка пера, галтелей, торцов замка и уплотнительного гребешка.

Для определения рабочего режима наплавки был смоделирован процесс восстановления пера рабочей лопатки с варьированием мощности лазерного излучения, где было выявлено, что при мощности 200 Вт объем ванны на поверхности пера рабочей лопатки предельно мал, ввиду того что большая часть мощности поглощается на расплавление

присадочного материала. И поскольку при 300 Вт наблюдается чрезмерный рост температуры, превышающей температуру плавления материала, особенно в зоне наименьшей толщины пера, в области выходной кромки, был выбран рабочий режим наплавки с мощностью в 250 Вт.

В результате анализа макрошлифов не были обнаружены дефекты в структуре наплавленного материала, за исключением образования единичных пор на границах валиках в пределах допустимого.

Результаты испытаний на одноосное растяжение показали повышенный предел прочности и достаточно хорошее относительное удлинение по сравнению с механическими свойствами присадочного и основного материала, изготовленных традиционными методами.

Тем самым, метод лазерной порошковой наплавки позволяет производить ремонт рабочих лопаток первой ступени турбины высокого давления газотурбинного двигателя ДР-59Л, не прибегая к изготовлению новых лопаток.

## ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ИНФОРМАЦИЯ

**Вклад авторов.** С.В. Тюков — поиск публикаций по теме статьи, написание текста рукописи, разработка методологии, создание изображений, анализ данных, проведение исследования. Г.Г. Задьян — проверка данных, контроль, разработка методологии. Д.В. Мукин — моделирование в программном обеспечении, анализ данных, создание изображений. Р.В. Мендагалиев — проведение исследования, анализ данных, создание изображений. Р.С. Корсмик — руководство проектом, утверждение финальной версии, получение финансирования. Все авторы одобрили рукопись (версию для публикации), а также согласились нести ответственность за все аспекты работы, гарантируя надлежащее рассмотрение и решение вопросов, связанных с точностью и добросовестностью любой её части.

**Источники финансирования.** Исследование выполнено при поддержке Российского научного фонда (РНФ) в рамках проекта «Жаропрочные никелевые сплавы для аддитивных технологий: дизайн и исследование структуры и свойств» № 23-19-00622.

**Конфликт интересов.** Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией настоящей статьи.  
**Генеративный искусственный интеллект.** При создании настоящей статьи технологии генеративного искусственного интеллекта не использовались.

## ADDITIONAL INFO

**Author contributions:** S.V. Tyukov: investigation, writing—original draft, methodology, visualization, formal analysis; G.G. Zadykhan: validation, supervision, methodology; D.V. Mukin: software, formal analysis, visualization; R.V. Mendagaliev: investigation, formal analysis, visualization; R.S. Korsmik: supervision, writing—review & editing, funding acquisition. All the authors approved the version of the manuscript to be published and agreed to be accountable for all aspects of the work, ensuring that questions related to the accuracy or integrity of any part of the work are appropriately investigated and resolved.

**Funding sources:** The study was supported by the Russian Science Foundation as part of the project No. 23-19-00622, entitled Heat-resistant Nickel Alloys for Additive Technologies: Design and Study of Structure and Properties.

**Disclosure of interests:** The authors have no explicit or potential conflicts of interests associated with the publication of this article.

**Generative AI:** No generative artificial intelligence technologies were used to prepare this article.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Toyserkani E., Khajepour A., Corbin S. *Laser Cladding*. New York: Boca Raton, CRC Press; 2004.
2. Богуслав В.А., Муравченко Ф.М., Жеманюк П.Д. и др. Технологическое обеспечение эксплуатационных характеристик деталей ГТД. Запорожье: ОАО Мотор Сич. 2003.
3. Zheng J., Li Z., Chen X. Worn area modeling for automating the repair of turbine blades // *Int J Adv Manuf Technol*. 2006. Vol. 29. P. 1062–1067. doi: 10.1007/s00170-003-1990-6
4. Gao J., Folkes J., Yilmaz O., Gindy N. Investigation of a 3D non-contact measurement-based blade repair integration system // *Aircraft Engineering and Aerospace Technology*. 2015. С. 34–41.
5. Richter K., Orban S., Nowotny S. Laser cladding of the titanium alloy Ti6242 to restore damaged blades In: *International Congress on Applications of Lasers and Electro-Optics*. 2004. doi: 10.2351/1.5060222
6. Jones J., McNutt P., Tosi R., et al. Remanufacture of turbine blades by laser cladding, machining and in-process scanning in a single machine. In: *23rd Annual International Solid Freeform Fabrication*

*Symposium — An Additive Manufacturing Conference, SFF*. 2015. P. 821–827.

7. Nicolaus M., Rottwinkel B., Alfred I., et al. Future regeneration processes for high-pressure turbine blades // *CEAS Aeronaut J*. 2018. Vol. 9. P. 85–92. doi: 10.1007/s13272-017-0277-9

8. Uenal T., Gahn L., Kittel J., et al. Process Development for Tip Repair of Complex Shaped Turbine Blades with IN718 // *Procedia Manufacturing*. 2020. Vol. 47. P. 1050–1057. doi: 10.1016/j.promfg.2020.04.114 EDN: QQNHKW

9. Brandt M., Sun S., Alam N., et al. Laser cladding repair of turbine blades in power plants: from research to commercialization // *International Heat Treatment and Surface Engineering*. 2019. Vol. 3, N. 3. P. 105–114. doi: 10.1179/174951409X12542264513843 EDN: GKKZTA

10. ТУ 14-1-3658-83 Прутки литые из жаропрочного литейного сплава марок ХН58КВТЮМБЛ-ВИ(ЧС70-ВИ), (СН25-ВИ) : дата введения 1984-06-01. М.: Стандартинформ, 2001.

11. Material property data : official site. Дата обращения: 11.06.2024. Режим доступа: <https://matweb.com>

## REFERENCES

1. Toyserkani E, Khajepour A, Corbin S. *Laser Cladding*. New York: Boca Raton, CRC Press; 2004.
2. Boguslayev VA, Muravchenko FM, Zhemanyuk PD, et al. *Technological support of operational characteristics of gas turbine engine parts*. Zaporozhye: Motor Sich OJSC; 2003. (In Russ.)
3. Zheng J, Li Z, Chen X. Worn area modeling for automating the repair of turbine blades. *Int J Adv Manuf Technol*. 2006;29:1062–1067. doi: 10.1007/s00170-003-1990-6
4. Gao J, Folkes J, Yilmaz O, Gindy N. Investigation of a 3D non-contact measurement-based blade repair integration system. *Aircraft Engineering and Aerospace Technology*. 2015;34–41.
5. Richter K, Orban S, Nowotny S. Laser cladding of the titanium alloy Ti6242 to restore damaged blades. In: *International Congress on Applications of Lasers and Electro-Optics*. 2004. doi: 10.2351/1.5060222
6. Jones J, McNutt P, Tosi R, et al. Remanufacture of turbine blades by laser cladding, machining and in-process scanning in a single machine. In: *23rd Annual International Solid Freeform Fabrication*

*Symposium — An Additive Manufacturing Conference, SFF*. 2015:821–827.

7. Nicolaus M, Rottwinkel B, Alfred I, et al. Future regeneration processes for high-pressure turbine blades. *CEAS Aeronaut J*. 2018;9:85–92. doi: 10.1007/s13272-017-0277-9

8. Uenal T, Gahn L, Kittel J, et al. Process Development for Tip Repair of Complex Shaped Turbine Blades with IN718. *Procedia Manufacturing*. 2020;47:1050–1057. doi: 10.1016/j.promfg.2020.04.114 EDN: QQNHKW

9. Brandt M, Sun S, Alam N, et al. Laser cladding repair of turbine blades in power plants: from research to commercialization. *International Heat Treatment and Surface Engineering*. 2019;3(3):105–114. doi: 10.1179/174951409X12542264513843 EDN: GKKZTA

10. TU 14-1-3658-83 Cast rods from heat-resistant casting alloy grades KhN58KVTYuMBL-VI (ChS70-VI), (SN25-VI): date of introduction 1984-06-01. Moscow: Standartinform; 2001. (In Russ.)

11. Material property data: official site. Accessed: 11.06.2024. Available from: <https://matweb.com>

## ОБ АВТОРАХ

**\*Степан Витальевич Тюков**, инженер технологического отдела, Институт лазерных и сварочных технологий, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет; адрес: 190121, Санкт-Петербург, ул. Лоцманская, 3; eLibrary SPIN: 5740-6330; e-mail: step@tukv.ru

**Григорий Григорович Задьян**, специалист технологического отдела, Институт лазерных и сварочных технологий, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет; eLibrary SPIN: 5240-2062; e-mail: gzadykyan@mail.ru

**Дмитрий Вячеславович Мукин**, младший научный сотрудник, специалист отдела моделирования и информационных технологий, Институт лазерных и сварочных технологий, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет; eLibrary SPIN: 7660-7455; e-mail: mukin@ilwt.smtu.ru

**Руслан Валисович Мендагалиев**, канд. техн. наук, младший научный сотрудник, начальник отдела исследований и разработки новых материалов, Институт лазерных и сварочных технологий, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет; eLibrary SPIN: 5187-4723; e-mail: ruslanm888@mail.ru

**Рудольф Сергеевич Корсмик**, канд. техн. наук, младший научный сотрудник, начальник технологического отдела, Институт лазерных и сварочных технологий, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет; eLibrary SPIN: 6726-2629; e-mail: r.korsmik@ltc.ru

## AUTHORS' INFO

**\*Stepan V. Tyukov**, engineer of technological department, Institute of laser and welding technologies, Saint Petersburg State Marine Technical University; address: Lotsmanskaya, 3, Saint Petersburg, 190121, Russia; eLibrary SPIN: 5740-6330; e-mail: step@tukv.ru

**Grigory G. Zadykyan**, specialist of technological department, Institute of laser and welding technologies, Saint Petersburg State Marine Technical University; eLibrary SPIN: 5240-2062; e-mail: gzadykyan@mail.ru

**Dmitriy V. Mukin**, junior researcher, specialist of the modelling and information technology department, Institute of laser and welding technologies, Saint Petersburg State Marine Technical University; eLibrary SPIN: 7660-7455; e-mail: mukin@ilwt.smtu.ru

**Ruslan V. Mendagaliev**, Cand. Sci. (Engineering), junior researcher, Head of research and development of new materials department, Institute of laser and welding technologies, Saint Petersburg State Marine Technical University; eLibrary SPIN: 5187-4723; e-mail: ruslanm888@mail.ru

**Rudolf S. Korsmik**, Cand. Sci. (Engineering), junior researcher, Head of technological department, Institute of laser and welding technologies, Saint Petersburg State Marine Technical University; eLibrary SPIN: 6726-2629; e-mail: r.korsmik@ltc.ru

---

\* Автор, ответственный за переписку / Corresponding author

Сообщение о ретракции

DOI: [https://doi.org/10.52899/24141437\\_2025\\_02\\_271](https://doi.org/10.52899/24141437_2025_02_271)

EDN: TVEWVN

## Сообщение о ретракции: «Влияние мощности лазерного излучения и термической обработки на свойства образцов из жаропрочного никелевого сплава» (EDN: XMROEV)

По предложению редакции Журнала «Труды СПбГМТУ» и в соответствии с рекомендациями Ассоциации научных редакторов и издателей (АНРИ) редакционная коллегия журнала провела сравнительный анализ двух статей показавший практически полное совпадение текстов указанных публикаций:

- А.В. Балякин и др. Влияние мощности лазерного излучения и термической обработки на свойства образцов из жаропрочного никелевого сплава // Труды Санкт-Петербургского государственного морского технического университета. 2024. № 4(12). С. 15–29. EDN: XMROEV.
- Балякин А.В. Процесс прямого лазерного выращивания жаропрочного сплава: влияние мощности и термической обработки на микроструктуру и механические характеристики // Вестник Сибирского государственного индустриального университета. 2023. № 4(46). С. 64–78. DOI: 10.57070/2304-4497-2023-4(46)-64-78. EDN: STILTW.

Идентичны разделы «Введение», «Методы и принципы исследования», «Основные результаты», «Обсуждение», «Выводы».

Библиографический список отличается, в нем присутствует только несколько одинаковых источников.

Статья «Влияние мощности лазерного излучения и термической обработки на свойства образцов из жаропрочного никелевого сплава», опубликованная в журнале «Труды СПбГМТУ», является смысловой копией статьи «Процесс прямого лазерного выращивания жаропрочного сплава: влияние мощности и термической обработки на микроструктуру и механические характеристики», опубликованной в журнале «Вестник Сибирского государственного индустриального университета».

Обращено внимание, что дата поступления рукописи в журнал «Труды СПбГМТУ» позже даты поступления идентичной рукописи в журнал «Вестник Сибирского государственного индустриального университета». В связи с выявлением дублирования статей в двух научных изданиях 4 мая 2025 г. редакционная коллегия журнала «Труды СПбГМТУ» постановила: отозвать статью «Влияние мощности лазерного излучения и термической обработки на свойства образцов из жаропрочного никелевого сплава» / А.В. Балякин, Е.А. Носова, М.А. Олейник, Е.П. Злобин // Труды Санкт-Петербургского государственного морского технического университета. 2024. № 4(12). С. 15–29. EDN: XMROEV.

**Ключевые слова:** процесс прямого подвода энергии и материала; сплав ЭП648; мощность лазерного излучения; механические свойства при растяжении; термообработка; микроструктура; твердость; ретракция.

### Для цитирования:

Сообщение о ретракции: «Влияние мощности лазерного излучения и термической обработки на свойства образцов из жаропрочного никелевого сплава» (EDN: XMROEV) // Труды Санкт-Петербургского государственного морского технического университета. 2025. Т. 4, № 2. С. 271–272. DOI: 10.52899/24141437\_2025\_02\_271 EDN: TVEWVN

Retraction notice

DOI: [https://doi.org/10.52899/24141437\\_2025\\_02\\_271](https://doi.org/10.52899/24141437_2025_02_271)

EDN: TVEWVN

## Notice of Article Retraction: “The Effect of Laser Radiation Power and Heat Treatment on The Properties of Heat-Resistant Nickel Alloy Samples” (EDN: XMROEV)

At the recommendation of the Editorial Board of *Transactions of the St. Petersburg State Marine Technical University* journal and in accordance with the guidelines of the Association of Scientific Editors and Publishers, the Journal's Editorial Board conducted a comparative analysis of the two articles. The analysis revealed an almost complete similarity of the following publications:

- Balyakin AB, et al. The Effect of Laser Radiation Power and Heat Treatment on The Properties of Heat-Resistant Nickel Alloy Samples. *Transactions of the St. Petersburg State Marine Technical University*. 2024;4(12):15–29. EDN: XMROEV
- Balyakin AB. Process of Direct Laser Growth of Heat-Resistant Alloy: Influence of Power and Heat Treatment on Microstructure and Mechanical Characteristics. *Bulletin of the Siberian State Industrial University*. 2023;4(46):64–78. doi: 10.57070/2304-4497-2023-4(46)-64-78 EDN: STILTW

The Introduction, Research Methods and Principles, Primary Results, Discussion, and Conclusion sections are identical. However, the list of references differs, and only a few of the same sources are present.

The article entitled *The Effect of Laser Radiation Power and Heat Treatment on The Properties of Heat-Resistant Nickel Alloy Samples* published in the *Transactions of the St. Petersburg State Marine Technical University* journal is a semantic copy of the article entitled *Process of Direct Laser Growth of Heat-Resistant Alloy: Influence of Power and Heat Treatment on Microstructure and Mechanical Characteristics* published in the *Bulletin of the Siberian State Industrial University* journal.

Notably, the manuscript was first submitted to the *Bulletin of the Siberian State Industrial University* journal before being submitted to the *Transactions of the St. Petersburg State Marine Technical University* journal. Due to the detection of duplicate articles in two scientific editions on May 4, 2025, the Editorial Board of the *Transactions of the St. Petersburg State Marine Technical University* journal decided to retract the article cited as Balyakin AB, et al. The Effect of Laser Radiation Power and Heat Treatment on The Properties of Heat-Resistant Nickel Alloy Samples. *Transactions of the St. Petersburg State Marine Technical University*. 2024;4(12):15–29. EDN: XMROEV.

**Keywords:** direct energy and material supply process; EP648 alloy; laser radiation power; mechanical properties in tension; heat treatment; microstructure; hardness; retraction.

### To cite this article

Notice of Article Retraction: “The Effect of Laser Radiation Power and Heat Treatment on The Properties of Heat-Resistant Nickel Alloy Samples” (EDN: XMROEV). *Transactions of the Saint Petersburg State Marine Technical University*. 2025;4(2):271–272. DOI: 10.52899/24141437\_2025\_02\_271 EDN: TVEWVN