

# 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 3



# ТРУДЫ Санкт-Петербургского государственного морского технического университета

ISSN 2414-1437 (Print)

16+

Том 4 | Выпуск 3 | 2025  
Сквозной номер (15)

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. Лощманская, 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. Лощманская, 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. Рельева*  
Литературный редактор: *Е.В. Мурашкин*  
Корректор: *Е.В. Мурашкин*  
Переводчик: *Е.О. Кондратьева*  
Верстка: *Д.А. Полунин*

Формат 60 × 84/8. Усл.-печ. л. 18,5.  
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 № 5-9265-1v. Подписано в печать 23.09.2025.  
Выход в свет 30.09.2025

## 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 (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 (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)

*Сиву Гун* — PhD, Чжэцзянский океанический университет (Ханчжоу, Китай)

*Сюэ 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 техн. наук, профессор кафедры морских информационных систем и технологий, СПбГМТУ (Санкт-Петербург, Россия)

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

*Юрий Леонардович Слек* — д-р техн. 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 3 | 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 (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 (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, Professor 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

---

## МАШИНОСТРОЕНИЕ

- Особенности применения метода парциальных откликов при исследовании вибрации квазидномерных конечно-элементных моделей ..... 277  
*А.Л. Мелконян, Д.А. Николаев*
- О влиянии параметров импульсов на интенсивность удаления органических слоев с углеродистой стали и других материалов при пиролизной очистке с использованием наносекундных технологических лазеров ..... 291  
*О.Г. Девойно, Д.А. Шпакевич, А.В. Горбунов, А.С. Лапковский, Л.И. Пилецкая, А.Ю. Рудницкий*
- Исследование влияния формы впускного клапана с различным числом спиральных направляющих (лопастей), при изменении температуры в цилиндре судового малоразмерного двигателя Ч8,5/11 ..... 303  
*А.З. Курбанов, Н.М. Вагабов, Н.К. Санаев, В.В. Егоров*
- Исследование прочности полимерной матрицы под влиянием температурно-временного фактора ..... 317  
*А.А. Соловьев*
- Обзор методов численного моделирования скоростного ледового сопротивления ..... 327  
*М.А. Бережная, Н.В. Тряскин, С. Юй, Б. Чжао*
- Исследование активности ингибиторов атмосферной коррозии против плесневых грибов ..... 341  
*Е.И. Карзина, М.А. Гайдим*

## СВАРКА, РОДСТВЕННЫЕ ПРОЦЕССЫ И ТЕХНОЛОГИИ

- Теоретическое описание транспортировки частиц порошка в рабочую зону прямого лазерного выращивания ..... 347  
*Д.В. Мукин, Н.В. Ларионов, В.М. Молчановский, И.Н. Юдин*
- Влияние газового потока на образцы, изготовленные методом селективного лазерного сплавления ..... 355  
*З. Мианджи, А.Ю. Кобицкий, В.В. Черноволов, Р.М. Жуков, Д.Н. Тужилин, Е.В. Раевский*
- Разработка технологии перфорации жаровых труб, покрытых термозащитным покрытием ..... 365  
*Я.П. Мигдалев, Е.В. Раевский*
- Конструктивные методы минимизации остаточных напряжений при прямом лазерном выращивании ..... 375  
*С.Ю. Иванов*
- Снятие термобарьерного покрытия посредством лазерной очистки ..... 385  
*В.С. Жданов, Г.А. Аккузин, Г.Г. Задыкян, Р.С. Корсмик*

## ЭНЕРГЕТИКА И ЭЛЕКТРОТЕХНИКА

- Математические и схемные модели испытательных генераторов импульсных помех для расчетов в области электромагнитной совместимости ..... 393  
*А.А. Воршевский, П.А. Воршевский, М.Т. Киав, Х.А. Хейн*
- Выявление аномалий при анализе результатов гидроакустических измерений нестационарных процессов ..... 401  
*Е.К. Самаров*
- Компьютерное моделирование воздействия электростатического разряда в частотной области ..... 407  
*Р.Я. Низкий*
- Система хранения и подачи водорода в батарею топливных элементов ..... 413  
*С.Я. Галушин*

# CONTENTS

---

## MECHANICAL ENGINEERING

Special Aspects of Using Partial Response Method in Studying Vibration of Quasi-One-Dimensional Finite Element Models .....	277
<i>A.L. Melconian, D.A. Nikolaev</i>	
The Effect of Pulse Parameters on Intensity of Removal of Organic Layers From Carbon Steel and Other Materials During Pyrolysis Using Nanosecond Industrial Lasers .....	291
<i>O.G. Devoino, D.A. Shpakevich, A.V. Gorbunov, A.S. Lapkovsky, L.I. Piletskaya, A.Yu. Roudnitsky</i>	
Effect of Shape of Intake Valve With Different Number of Spiral Guides (Blades) When Changing Temperature in the Cylinder of Small-Sized Marine Engine Ch8.5/11 .....	303
<i>A.Z. Kurbanov, N.M. Vagabov, N.K. Sanaev, V.V. Egorov</i>	
Investigation of Strength of Polymer Matrix Under the Influence of Temperature Time Factor .....	317
<i>A.A. Solovev</i>	
Methods of Numerical Modeling of High-Velocity Ice Resistance: A Review .....	327
<i>M.A. Berezhnaya, N.V. Tryaskin, X. Yu, Bowen Zhao</i>	
Investigation of Atmospheric Corrosion Inhibitors' Activity Against Mold Fungi .....	341
<i>E.I. Karzina, M.A. Gaidym</i>	

## WELDING, RELATED PROCESSES AND TECHNOLOGIES

Theoretical Description of Powder Delivery to Direct Laser Deposition Area .....	347
<i>D.V. Mukin, N.V. Larionov, V.M. Molchanovsky, I.N. Udin</i>	
Effect of Gas Flow on Samples Produced by Selective Laser Melting .....	355
<i>Z. Mianji, A.Yu. Kobitsky, V.V. Chernovolov, R.M. Zhukov, D.N. Tuzhilin, Evgeny V. Rayevsky</i>	
Development of Punching Technology for Combustion Liners with Thermal Control Coatings .....	365
<i>Ya.P. Migdalev, E.V. Raevskiy</i>	
Design Methods Used to Minimize Residual Stresses in Direct Laser Deposition .....	375
<i>S.Yu. Ivanov</i>	
Removal of Thermal Barrier Coating by Laser Cleaning .....	385
<i>V.S. Zhdanov, G.A. Akkuzin, G.G. Zadykyan, R.S. Korsmik</i>	

## ENERGY AND ELECTRICAL ENGINEERING

Mathematical Models and Circuits of Test Impulse Noise Generators for Electromagnetic Compatibility Calculations .....	393
<i>A.A. Worshevsky, P.A. Vorshevskii, Kyaw Myat Thu, Hein Htet Aung</i>	
Identification of Anomalies in Analysis of Hydroacoustic Measurements of Unsteady Processes .....	401
<i>E.K. Samarov</i>	
Computer Simulation of Effects of Electrostatic Discharge in Frequency Domain .....	407
<i>R.Ya. Nizkiy</i>	
Hydrogen Storage and Supply System for Fuel Cell Stack .....	413
<i>S.Ya. Galushin</i>	

Оригинальное исследование

УДК 629.12:539.433

DOI: [https://doi.org/10.52899/24141437\\_2025\\_03\\_277](https://doi.org/10.52899/24141437_2025_03_277)

EDN: GWFEEI

# Особенности применения метода парциальных откликов при исследовании вибрации квазиодномерных конечно-элементных моделей

А.Л. Мелконян, Д.А. Николаев

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

## АННОТАЦИЯ

**Актуальность.** В настоящее время практически единственным численным методом, позволяющим решать задачи о получении параметров статического деформирования и вибрации сложных конструкций является метод конечных элементов и базирующиеся на его применении пакеты программ в основном зарубежного исполнения. Их применение, как правило, требует существенных трудозатрат по подготовке исходных данных, применения вычислительной техники серьезного уровня, а также финансовых затрат по приобретению пакетов соответствующих программ. Разработка подхода, позволяющего в некоторых случаях минимизировать указанные требования, а также сравнительно просто создать на его основе отечественные расчетные программы, представляется достаточно актуальной.

**Цель работы** — разработать подходы, позволяющие менее трудозатратно и быстрее рассчитать параметры статического деформирования и связанных изгибно-продольно-крутильных установившихся колебаний (вибрации) конструкций, допускающих моделирование системами квазиодномерных конечно-элементных моделей.

**Материалы и методы.** В качестве *основного метода* в работе представлен вариант метода парциальных откликов, имеющий ряд существенных преимуществ при решении задач о вынужденных установившихся колебаниях или статическом деформировании конструкций, допускающих моделирование квазиодномерными конечно-элементными моделями. Особенность предлагаемого варианта, названного дискретным вариантом метода парциальных откликов, состоит в записи для вычисления элементов матриц парциальных откликов и парциальных параметров алгебраических уравнений, имеющих рекуррентный характер. При этом традиционное решение краевой задачи заменяется решением ряда задач о сопряжении пар парциальных систем, каждая из которых, с одной стороны, имеет свои краевые условия. Число рассматриваемых пар соответствует числу сечений, в которых исследователь хочет знать параметры исследуемого процесса (амплитуды линейных и угловых смещений, внутренних усилий, опорных реакций). Круг решаемых задач существенно расширяется, если использовать предложенный авторами метод коррекции и (или) модификации характеристик инерции и жесткости элементов квазиодномерной конечно-элементной модели, а также внешней нагрузки, на нее действующей. Такой подход позволяет получать квазиодномерные модели для решения как одномерных, так и многомерных задач, а также задач, в рамках которых требуется учесть влияние дополнительных факторов, усложняющих картину вибрации.

**Результаты.** В работе приведено несколько примеров применения дискретного варианта метода парциальных откликов в сочетании с методом коррекции и модификации характеристик квазиодномерных конечно-элементных моделей.

**Заключение.** Анализ полученных результатов позволяет сделать вывод о достижении поставленной цели, что подтверждается разработкой дискретного варианта метода парциальных откликов, позволяющего для определенного класса конструкций выполнять расчеты параметров деформирования и установившихся колебаний.

**Ключевые слова:** парциальные отклики и параметры; параметры вибрации; квазиодномерная конечно-элементная модель; квазистатическая аналогия; комплексность параметров; коррекция и модификация.

## Как цитировать

Мелконян А.Л., Николаев Д.А. Особенности применения метода парциальных откликов при исследовании вибрации квазиодномерных конечно-элементных моделей // Труды Санкт-Петербургского государственного морского технического университета. 2025. Т. 4, № 3. С. 277–289. DOI: [10.52899/24141437\\_2025\\_03\\_277](https://doi.org/10.52899/24141437_2025_03_277) EDN: GWFEEI

Original Study Article

DOI: [https://doi.org/10.52899/24141437\\_2025\\_03\\_277](https://doi.org/10.52899/24141437_2025_03_277)

EDN: GWFEI

# Special Aspects of Using Partial Response Method in Studying Vibration of Quasi-One-Dimensional Finite Element Models

Armen L. Melconian, Dmitry A. Nikolaev

Saint Petersburg State Marine Technical University, Saint Petersburg, Russia

## ABSTRACT

**BACKGROUND:** Today, the finite element method (and software packages based on it, mainly foreign) is substantially the only computational method that actually allows solving parametrization problems of static deformation and vibration of complex structures. They often require much effort to prepare the inputs, advanced computing equipment, and funds to purchase the corresponding software packages. The development of an approach allowing to occasionally reduce the requirements and to relatively easily develop domestic computational software based on it seems quite relevant.

**AIM:** To develop approaches that allow for less labor-intensive and faster parametrization of static deformation and associated flexural, longitudinal, and torsional steady-state oscillations (vibrations) of structures, allowing modeling by systems of quasi-one-dimensional finite element models.

**METHODS:** The basic investigation method used in the study is a modification of the partial response method with some significant advantages in solving problems of steady-state forced vibration or static deformation of structures that allow modeling using quasi-one-dimensional finite element models. The proposed method—the discrete modification of the partial response method—consists in the recording of partial responses and recurrent partial parameters of algebraic equations to calculate the matrix entries. In this case, the conventional solution of the boundary value problem is replaced by the solution of a series of conjugation problems for pairs of partial systems, where each has its own boundary data. The number of pairs under consideration corresponds to the number of sections, for which the researcher wants to parametrize the studied process (amplitudes of linear and angular displacements, internal forces, and end reactions). The scope of problems to be solved is significantly expanded by using the method proposed by the authors to correct and/or modify the inertia and rigidity of elements of a quasi-one-dimensional finite element model and the external load acting on it. This approach allows us to build quasi-one-dimensional models for solving both one-dimensional and multidimensional problems and problems requiring to consider the additional factors that complicate the vibration pattern.

**RESULTS:** The paper presents several applications of the discrete modification of the partial response method in combination with the correction and modification of the parameters of quasi-one-dimensional finite element models.

**CONCLUSION:** The study allows us to conclude that the aim has been achieved, which is confirmed by the development of a discrete modification of the partial response method, allowing to calculate deformation parameters and steady-state vibrations for a certain class of structures.

**Keywords:** partial responses and parameters; vibration parameters; quasi-one-dimensional finite element model; quasi-static analogy; complexity of parameters; correction and modification.

## To cite this article

Melconian AL, Nikolaev DA. Special Aspects of Using Partial Response Method in Studying Vibration of Quasi-One-Dimensional Finite Element Models. *Transactions of the Saint Petersburg State Marine Technical University*. 2025;4(3):277–289. DOI: 10.52899/24141437\_2025\_03\_277 EDN: GWFEI

Submitted: 12.03.2025

Accepted: 24.06.2025

Published online: 22.09.2025

## ВВЕДЕНИЕ

Бурное развитие возможностей вычислительной техники, начавшееся во второй половине прошлого века, привело к возможности получения решений задач численными методами. Именно тогда началось широкое применение методов, основанных на *прямом конструировании моделей конструкций из конечных элементов*. Наибольшее развитие и распространение получил метод конечных элементов (МКЭ), как метод, дающий возможность получения модели, наиболее соответствующей реальному объекту, а алгоритм расчета использовал пакеты стандартных программ [1, 2]. Однако применение альтернативных методов в некоторых случаях оказывается достаточно эффективным.

В настоящей статье остановимся на применении метода парциальных откликов (МПО) [3]. Суть метода — любая исследуемая система (в частном случае — механическая) делится на две самостоятельные (парциальные) сопрягаемые части: правую и левую парциальные системы (ПС). Для них вводятся парциальные отклики (ПО) (реакции на единичные воздействия, которые сводятся в матрицу ПО) и парциальные параметры (ПП) (реакции ПС на внешние воздействия, сводящиеся в матрицу-столбец ПП). В точке сопряжения правой и левой ПС записываются уравнения неразрывности, решение которых позволяет сначала найти элементы матрицы-столбца реакций внутренних связей, а затем элементы матрицы-столбца соответствующих смещений. Очевидно, что поскольку на практике требуется находить реакции внутренних связей и соответствующие смещения в конечном числе точек, то необходимо рассмотреть сопряжение соответствующего числа пар ПС. При этом крайне желательно уметь записывать для вычисления ПО и ПП обеих ПС рекуррентные соотношения. Первоначально для получения ПО в работе [3] В.С. Чувиловским предлагалось использовать дифференциальные уравнения или уравнения в конечных разностях.

Особенно удобно применение МПО в частном случае, когда объектом исследования является модель в виде *квазиодномерной конечно-элементной системы*. Такая система удобна при рассмотрении конструкций, один размер которой существенно больше двух других (например, балки, колонны, судовой корпус и т.п.). При вычисленных элементах матриц ПО и ПП в точках сопряжения левой (L) и правой (R) парциальных систем должно выполняться условие неразрывности:

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} A_{ij}^L & B_{ij}^L \\ C_{ij}^L & D_{ij}^L \end{bmatrix} \begin{bmatrix} N_j \\ M_j \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} W_i^L \\ \theta_i^L \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} w_i \\ \mathcal{G}_i \end{bmatrix} = \\ &= - \begin{bmatrix} A_{ij}^R & B_{ij}^R \\ C_{ij}^R & D_{ij}^R \end{bmatrix} \begin{bmatrix} N_j \\ M_j \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} W_i^R \\ \theta_i^R \end{bmatrix}, \end{aligned} \quad (1)$$

где  $\begin{bmatrix} N_j \\ M_j \end{bmatrix}$  — матрица столбец неизвестных внутренних

усилий, а  $\begin{bmatrix} w_i \\ \mathcal{G}_i \end{bmatrix}$  — матрица столбец неизвестных линей-

ных и угловых смещений,  $i = \tau, n, b; j = \tau, n, b$  — оси естественной системы координат. В (1) нижние индексы у ПО  $i, j$  означают, что усилие, ориентированное вдоль оси  $j$ , вызывает смещение вдоль оси  $i$ ;  $A_{ij}, C_{ij}$  — линейные смещения вдоль оси  $i$  от единичной силы  $N_j = 1$  и единичного момента  $M_j = 1$ , соответственно;  $B_{ij}, D_{ij}$  — угол поворота вокруг оси  $i$  от единичной силы  $N_j = 1$  и единичного момента  $M_j = 1$ , соответственно;  $W_j, \theta_j$  — линейное смещение и угол поворота относительно оси  $j$  от всей внешней нагрузки, действующей на соответствующую ПС.

Уравнение (1), как уже говорилось, позволяет в точке сопряжения сначала найти элементы матрицы внутренних усилий, а затем элементы матрицы линейных и угловых смещений.

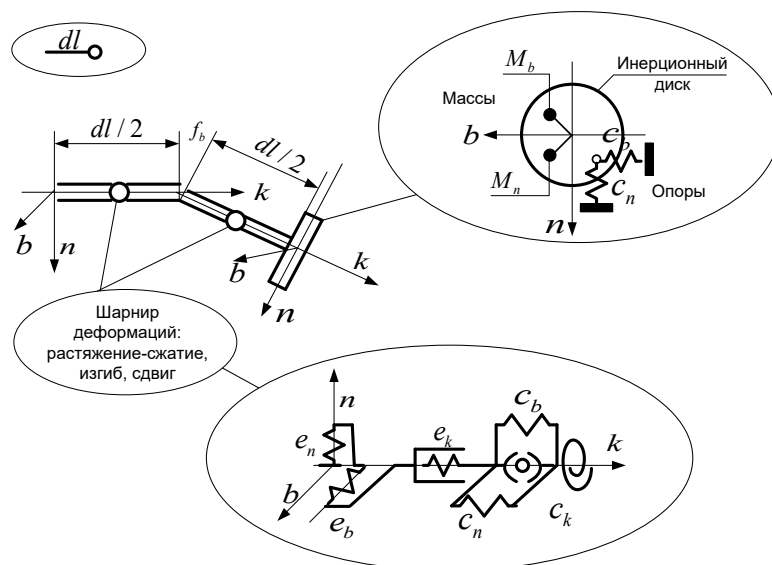
Для плоской модели рекуррентные зависимости вычисления ПО и ПП при наращивании парциальных систем на подэлементы базовых элементов, получаемые с применением дискретного варианта МПО приведены в работах [4, 5]. Его суть состоит в *записи для изменения ПО алгебраических уравнений, носящих рекуррентный характер*. Для общего случая формулы выводятся из аналогичных физических соображений, но имеют существенно более сложную структуру. При желании с ними можно ознакомиться в [6, 7].

## КВАЗИОДНОМЕРНАЯ КОНЕЧНО-ЭЛЕМЕНТНАЯ МОДЕЛЬ

На первом этапе работы при решении задач о моделировании процесса вынужденных установившихся колебаний квазиодномерной дискретной системы, представляющей собой цепочку последовательно соединенных однотипных конечных элементов, которые ниже будем называть «базовыми», была предложена физическая модель в виде пространственно-криволинейной упругой дискретной системы (ПКУДС).

Устройство базового элемента представлено на рис. 1. Здесь изображены четыре безинерционных стержня; пары крайних соединены двумя обобщенными шарнирами деформаций, позволяющим смещения и повороты относительно трех ортогональных осей, а между средними возможны три последовательных поворота осей местной системы координат элемента; заканчивается базовый элемент инерционным диском, обладающим тензором инерции (при этом, к диску в заданных точках могут быть дополнительно прикреплены точечные массы жестко или на упругих связях, допускающих движение только вдоль одной из координатных осей). В случае наличия





**Рис. 1.** Устройство «базового» элемента пространственно-криволинейной упругой дискретной системы.

**Fig. 1.** Layout of the basic element of a curvilinear-space elastic discrete system.

у элемента опоры, обладающей заданными жесткостями в определенных направлениях, действие ее реакций также приводится к соответствующей точке инерционного диска (см. рис.1). Выбранная геометрия обусловлена тем, что криволинейные участки заменяются описывающей ломаной, к которой инерционные диски ортогональны.

Материал модели предполагается линейно-упругим, но с введением в него неупругих сопротивлений комплексностью инерционно-жесткостных характеристик [1, 3, 4, 6]; при этом внутренние сопротивления, пропорциональные деформациям и (или) их скоростям (т.е. относительным параметрам) корректируют жесткости в шарнире деформаций (т.е. вызывают появление у их величин мнимой части), а внешние сопротивления (пропорциональные абсолютным скоростям) — корректируют соответствующие инерционные характеристики (т.е. вызывают появление у их величин мнимой части). Ввиду малости деформаций и перемещений при вибрации задача решается в геометрически линейной постановке. В качестве основной кинематической гипотезы, позволяющей свести задачу теории упругости к задаче строительной механики, принята гипотеза плоских сечений с поправкой на сдвиг.

Внешняя динамическая нагрузка на рассматриваемую линейную модель в виде ПКУДС предполагается периодической. Она может быть представлена гармоническим рядом. Действие каждой гармоники рассматривается отдельно, а общее решение получается суперпозицией частных решений. Такой подход обусловлен тем, что величины присоединенных масс жидкости зависят от формы вынужденных колебаний рассчитываемой конструкции, которая, в свою очередь, изменяется с изменением частоты возбуждения. Прикладываемая внешняя нагрузка в виде сосредоточенных или распределенных сил и моментов автоматически приводится к центрам инерционных дисков элементов.

Анализ параметров установившихся колебаний позволяет перейти к квазистатическому варианту модели [1, 3, 4, 6]. В этом случае модель также представляет собой последовательность базовых элементов, но вместо инерционного диска (см. квазистатическую аналогию в [1, 3, 4, 6]) вводится опора, обладающая отрицательной упругостью, т.е. новая модель представляет собой последовательность абсолютно твердых и безынерционных элементов, соединенных между собой и неподвижным основанием упругими связями, каждая из которых порождает усилия определенной структуры (пропорциональные смещению, скорости, ускорению). При этом характеристики жесткости могут быть комплексными величинами (см. метод комплексных параметров в [1, 3, 4, 6]). В частном случае, когда частота колебаний равна нулю, имеет место статический расчет параметров деформирования квазиодномерной модели.

Особенно удобно такое представление конструкций на ранних стадиях их проектирования [8] (например, для судового корпуса), когда о них еще нет полных данных, что затрудняет применение классического метода конечных элементов.

**Цель**, которую ставили перед собою авторы состоит в создании достаточно простой и физически понятной модели для расчета параметров вибрации таких конструкций и, вместе с тем, соответствующих алгоритма и программы расчета, вычисления по которым могут быть выполнены на персональных компьютерах пользователей с высокой скоростью.

## АЛГОРИТМ И ПРОГРАММА РАСЧЕТА

В качестве математического метода, принятого при разработке алгоритма расчета и программы вычислений

параметров деформации квазистатического варианта оди-  
ночной модели, был выбран метод парциальных откликов  
(МПО) в его дискретном варианте [4–7]. Выбранный подход  
позволил избежать традиционного решения краевой зада-  
чи, представляющего собой, на взгляд авторов, существен-  
но более сложный и трудоемкий процесс. Выбор в качестве  
ПО смещений от единичных усилий соответствует причинно-  
следственным связям в задачах строительной механики,  
что гарантирует, при соответствующем построении алгорит-  
ма расчета, соответствие устойчивости результатов вычис-  
лений и устойчивости моделируемого процесса [3].

По предложенному в [7] алгоритму для пространствен-  
ной квазиодномерной конечно-элементной модели были  
разработаны алгоритм и первый вариант расчетной про-  
граммы «Рамы» [9], позволивший, во-первых, достаточно  
просто создавать либо одиночную пространственно-кри-  
волинейную квазиодномерную конечно-элементную мо-  
дель, либо систему из нескольких таких моделей, свя-  
занных между собой в нескольких точках специальными  
шарнирами. В свою очередь, каждая из квазиодномерных  
конечно-элементных моделей представляет собой после-  
довательность из прямолинейных и (или) криволинейных  
участков. Каждый из таких участков состоит из задавае-  
мого исследователем числа последовательно соединен-  
ных базовых элементов. Инерционно-жесткостные харак-  
теристики базовых элементов в пределах участка могут  
быть либо одинаковыми, либо меняться по трапецевид-  
ному закону. Величины этих характеристик могут либо  
задаваться исследователем вручную, либо вычисляться  
встроенным в программу модулем для профиля, входя-  
щего в предлагаемую программой базу либо нарисован-  
ного исследователем. Для каждого участка предусмотрена  
возможность введения в заданной точке опоры с зада-  
ваемыми жесткостями в нужных направлениях, а также  
сосредоточенных сил, моментов и распределенной на-  
грузки. Для каждого инерционного диска предусмотрена  
возможность прикрепления жестко либо на упругой связи  
точечной массы. Все эти параметры конечно-элементной  
модели могут быть откорректированы даже после того,  
как модель сформирована.

Во-вторых, для сформированной модели программа  
позволяет рассчитать амплитуды параметров вибрации  
(линейные и угловые смещения, внутренние силы и мо-  
менты, опорные реакции) каждого из базовых элементов.  
Распределения этих параметров вдоль нейтральной оси  
модели выводятся на экран и сохраняются в файл. В окне

справа указываются максимальные значения этих параме-  
тров. При необходимости построения амплитудно-частот-  
ной характеристики (АЧХ) в окне программы нажимается  
кнопка с изображением зигзага. Анализ АЧХ позволяет  
определить резонансные частоты и совпадающие с ними  
частоты, соответствующих типов собственных колебаний  
(изгибных в горизонтальной и вертикальной плоскостях,  
продольных, крутильных).

Следует заметить, что исследователь должен помнить,  
что если модель и внешняя нагрузка, на нее действующая,  
обладают свойством симметрии, то у нее не могут  
реализоваться резонансы, соответствующие четным соб-  
ственным частотам, а если модель и внешняя нагрузка  
антисимметричны, не могут быть реализованы резонансы,  
соответствующие нечетным собственным частотам. Таким  
образом, чтобы найти все собственные частоты модели,  
необходимо корректно задать внешнюю нагрузку.

В качестве иллюстрации вывода рекуррентных вы-  
ражений в рамках дискретного варианта МПО для ПО  
и ПП ниже приведено их получение для плоской задачи  
об изгибной вибрации непризматической балки.

## РАСЧЕТ ПАРАМЕТРОВ ИЗГИБНОЙ ВИБРАЦИИ МЕТОДОМ ПАРЦИАЛЬНЫХ ОТКЛИКОВ

Рассмотрим одномерную конструкцию из [10] длины  $L$ ,  
для которой известны граничные условия и распределе-  
ния вдоль ее продольной оси  $x$  массы  $m^*(x)$ , жесткости  
на изгиб  $E \cdot J(x)$ , жесткости упругого основания  $c(x)$   
и внешних гармонически изменяющихся во времени по-  
перечной силовой  $q(x) \sin \omega t$  и моментной  $\mu(x) \sin \omega t$   
нагрузок.

Если конструкцию мысленно расщесть на две части  
в сечении с координатой  $x$ , то внутренними параметра-  
ми процесса ее изгибной вибрации будут смещение по-  
перечного сечения  $w(x)$ , угол поворота этого поперечно-  
го сечения  $\vartheta(x)$ , поперечная сила  $N(x)$  и изгибающий  
момент  $M(x)$ .

Сконструируем дискретную расчетную модель  
для исследования изгибных установившихся колебаний  
конструкции как совокупность из  $n$  однотипных после-  
довательно соединенных элементов, состоящих из масс,  
шарнирно соединенных абсолютно жестких стержней и  
безынерционных линейных и спиральных пружин  
(см. рис. 2); на каждую из масс действуют внешние

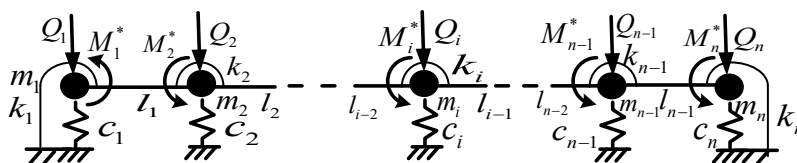


Рис. 2. Вид конечно-элементной модели.  
Fig. 2. View of a finite element model.

гармонически изменяющиеся во времени поперечная сила и изгибающий момент.

Характеристики элементов такой дискретной модели определяются как

$$l_i = \frac{L}{n-1}, \quad k_i = EJ_i \frac{l_{i-1} + l_i}{2}, \quad c_i = c_i^* \frac{l_{i-1} + l_i}{2},$$

$$m_i = m_i^* \frac{l_{i-1} + l_i}{2}, \quad Q_i = q_i \frac{l_{i-1} + l_i}{2}, \quad M_i^* = \mu_i \frac{l_{i-1} + l_i}{2},$$

$$i = 1, 2, \dots, n,$$

где  $L$  — протяженность конструкции,  $l_i, m_i, k_i, c_i, Q_i, M_i^*$  — протяженность, масса, изгибная жесткость, жесткость основания, внешняя сила и изгибающий момент для  $i$ -го элемента, соответственно. Очевидно, что при увеличении числа элементов дискретная модель неограниченно стремится к исходной конструкции. При этом граничные условия и наличие промежуточных опор должны быть учтены коррекцией значений жесткости соответствующих линейных и спиральных пружин (например, жесткая опора может моделироваться пружиной, жесткость которой превышает остальные на 5–7 порядков).

При наличии заданных коэффициентов внешних и внутренних сопротивлений массы и жесткости пружин дискретной модели будут комплексными величинами. Если внешние усилия, на нее действующие, будут содержать слагаемые, содержащие как  $\sin \omega t$ , так и  $\cos \omega t$ , их также следует записать в комплексной форме. В таком случае параметры процесса вибрации также станут комплексными величинами.

Применив квазистатическую аналогию, получим расчетную схему в виде безынерционной модели (см. рис. 3), для которой следует определить параметры статического деформирования.

На рис. 3 введены обозначения:  $u_i = -\omega^2 m_i$  — жесткость  $i$ -й опоры,  $Q_i, M_i^*$  — амплитудные значения внешних поперечных сил и изгибающих моментов, приложенных в  $i$ -м шарнире безынерционной модели. Вид  $i$ -го элемента с обозначением параметров его деформирования изображен на рис. 4.

Для нахождения параметров деформированного состояния безынерционной модели воспользуемся методом парциальных откликов в его дискретном варианте.

Введем следующий комплект ПО и ПП для левой части безынерционной системы, оканчивающейся  $i$ -м узлом:

- $A_{nn}(i)$  — поперечное смещение ее крайнего узла справа от действия единичной поперечной силы  $N=1$ ;
- $B_{bn}(i)$  — угол поворота поперечного сечения в ее крайнем узле справа от действия единичной поперечной силы  $N=1$ ;
- $C_{nb}(i)$  — поперечное смещение ее крайнего узла справа от действия единичного изгибающего момента  $M=1$ ;
- $D_{bb}(i)$  — угол поворота поперечного сечения в ее крайнем узле справа от действия единичного изгибающего момента  $M=1$ ;
- $W(i)$  — поперечное смещение ее крайнего узла справа от действия всей внешней нагрузки, приложенной к левой парциальной системе;
- $\theta(i)$  — угол поворота поперечного сечения в ее крайнем узле справа от действия всей внешней нагрузки, приложенной к левой парциальной системе.

Отметим, что введенные шесть коэффициентов полностью и однозначно определяют свойства левой парциальной системы.

Запишем алгоритм получения величин ПО и ПП по мере наращивания левой парциальной системы от первого узла до  $n$ -го (алгоритм, так называемого, «прямого хода»).

В соответствии с основной идеей метода парциальных откликов вычисление искомым коэффициентов податливостей будем производить последовательно не только от одного базового элемента модели к другому, но и внутри каждого базового элемента. При этом сначала вычисляются коэффициенты податливости до узловых точки (проход стержня длиной  $l_i$ ). Затем осуществляется проход вертикальной опоры жесткостью  $(c_i + u_i)$ . После чего проводится шарнир деформации, жесткость спиральной пружины которого  $k_i$ . Далее осуществляется приложение внешней нагрузки в виде силы  $Q_i$  и момента  $M_i^*$ . Парциальные отклики и парциальные параметры после прохода каждого этапа будут снабжаться сверху дополнительным штрихом.

При выводе формул примем следующее правило знаков: положительное направление для силы и вертикального смещения — вниз по вертикали, положительное направление для момента и угла поворота поперечного сечения — против часовой стрелки (см. рис. 4).

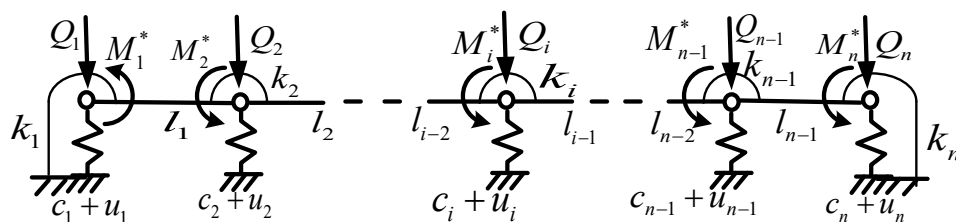
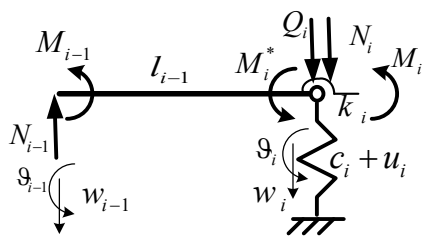


Рис. 3. Вид квазистатической конечно-элементной модели.

Fig. 3. View of a quasi-static finite element model.



**Рис. 4.** Вид «базового» элемента квазистатической модели.  
**Fig. 4.** View of the basic element of the quasi-static model.

Перейдем к непосредственному получению рекуррентных зависимостей для коэффициентов податливостей. Сначала вычислим искомые коэффициенты для первого узла модели:

$$A_{nn} = \frac{1}{c_1 + u_1}, \quad C_{nb} = B_{bn} = 0, \quad D_{bb} = \frac{1}{k_1},$$

$$W = \frac{Q_1}{c_1 + u_1}, \quad \theta = \frac{M_1^*}{k_1}. \quad (2)$$

Схема для вычисления ПО и ПП при наращивании левой парциальной системы стержнем длины  $l = l_i$  при приложении единичной поперечной силы изображена на рис. 5

В качестве примера для схемы, представленной на рис. 5, приведены выражения для ПО и ПП:

$$A'_{nn} = A_{nn}N + C_{nb}M - l(B_{bn}N + D_{bb}M) =$$

$$= A_{nn} - C_{nb}l - B_{bn}l + D_{bb}l^2;$$

$$B'_{bn} = B_{bn}N + D'_{bb}M = B_{bn} - D'_{bb}l;$$

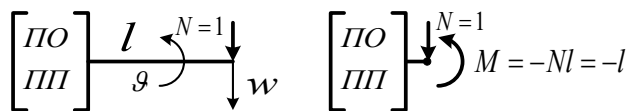
$$C'_{nb} = C_{nb}M - D'_{bb}Ml = C_{nb} - D'_{bb}l;$$

$$D'_{bb} = D_{bb}M = D_{bb}; \quad W' = W - \theta l; \quad \theta' = \theta. \quad (3)$$

При выводе этих зависимостей учитывалось, что приложение единичного усилия  $N = 1$  вызывает появление в предыдущем сечении такого же реактивного усилия  $N = 1$  и момента  $M = -lN = -l$ . Кроме того, прогиб в рассматриваемом сечении формируется не только прогибом в предыдущем сечении, но и дополнительным прогибом от угла поворота стержня.

Рассуждения для получения выражений для ПО и ПП при приложении единичного момента и внешней нагрузки аналогичны приведенным выше.

На следующем этапе учтем изменение ПО и ПП при прохождении упругой опоры жесткостью  $c = c_i + u_i$ . Для этого необходимо раскрыть своеобразную «статическую неопределенность», возникающую из-за появления реакции связи (см. рис. 6). Для упрощения записи верхний штрих у ПО и ПП опущен. ПО и ПП после прохода упругой опоры снабжены сверху двумя штрихами.



**Рис. 5.** Схема для вычисления ПО при приложении единичной силы.  
**Fig. 5.** Partial response calculation diagram (unit force is applied).

На рис. 6 изображена схема, позволяющая записать выражений для ПО и ПП при приложении единичной поперечной силы.

В качестве примера приведем нахождение ПО для схемы, изображенной на рис. 6:

$$w = \frac{R_1}{c} = A_{nn}(N - R_1),$$

отсюда

$$R_1 = \frac{cA_{nn}}{1 + cA_{nn}}. \quad (4)$$

Тогда

$$A''_{nn} = \frac{R_1}{c} = \frac{A_{nn}}{1 + cA_{nn}},$$

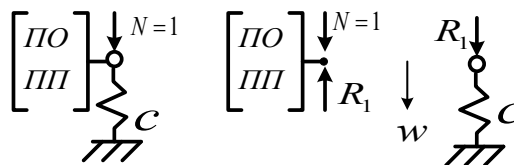
$$B''_{bn} = B_{bn}(N - R_1) = B_{bn}(1 - R_1). \quad (5)$$

Рассуждая аналогично, получим формулы для вычисления соответствующих ПО при ПП.

На следующем этапе парциальную систему следует нарастить шарниром деформаций (спиральной пружиной жесткостью  $k_i$ ), что приведет к изменению только одного парциального отклика:

$$D'''_{bb} = D''_{bb} + \frac{1}{k_2}. \quad (6)$$

На последнем этапе, в соответствии с рис. 4, следует приложить внешнюю нагрузку. Очевидно, что парциальные отклики при этом изменяться не будут, изменяются только парциальные параметры (новые значения имеют сверху три штриха). Убрав для упрощения записи верхние штрихи у ПО и ПП, получим:



**Рис. 6.** Схема для вычисления парциальных откликов при приложении единичной силы.

**Fig. 6.** Partial response calculation diagram (unit force is applied).

$$W''' = W + A_{mn}Q_i + C_{nb}M_i^*;$$

$$\theta''' = \theta + B_{bn}Q_i + D_{bb}M_i^* . \quad (7)$$

Продемонстрированные выше приемы позволяют получить полный комплект рекуррентных зависимостей, необходимых для перехода от одного элемента к другому и, как следствие, от одного участка к другому (наращивание левой парциальной системы до включения в нее стержня длиной  $l = l_{n-1}$ ).

Приведенные выше формулы для коэффициентов податливости относятся, строго говоря, лишь к левой парциальной системе. Но, как показано в [5, 7], ими можно условно пользоваться и для правой парциальной системы, если надлежащим образом записать условия сопряжения обеих систем.

## УЧЕТ ВЛИЯНИЯ ДОПОЛНИТЕЛЬНЫХ ФАКТОРОВ, ВЛИЯЮЩИХ НА КАРТИНУ ВИБРАЦИИ

В [11, 12] сформулирован и применен подход, позволяющий учитывать влияние дополнительных факторов, усложняющих картину установившихся колебаний квазиодномерной модели. На первом этапе подхода выполняется анализ влияния рассматриваемого фактора на модель (т.е. выявляется структура дополнительных усилий, порождаемых учетом этого фактора). На втором этапе дополнительные усилия условно разделяются на группы следующим образом:

1. Выделяются слагаемые первой группы, которые можно учесть коррекцией внешней нагрузки, прикладываемой к элементам квазистатической модели.
2. Ко второй группе относят слагаемые, прямо пропорциональные абсолютным смещениям, скоростям или ускорениям элементов модели, действие которых можно учесть коррекцией характеристик инерции этих элементов. Так зависимость дополнительного усилия от абсолютной скорости удобнее выполнить комплексностью характеристик инерции элементов, а зависимость от абсолютного ускорения (смещения) — отрицательностью (положительностью) величин соответствующих инерционных характеристик. Действие таких слагаемых приведет к коррекции жесткостей опор «базового» элемента квазистатической модели.
3. К третьей группе относят слагаемые, прямо пропорциональные абсолютным смещениям, скоростям или ускорениям, действие которых можно учесть модификацией характеристик инерции квазиодномерной модели (иными словами — оснастить модель новыми, ранее отсутствовавшими у нее, свойствами). Действие таких слагаемых приведет к введению в «базовый» элемент квазистатической модели дополнительных упругих опор, автоматически порождающих соответствующие усилия.

4. К четвертой группе относят слагаемые, прямо пропорциональные относительным смещениям или скоростям; их действие удобнее учесть при выводе формул для вычисления парциальных откликов.
5. К последней группе относим слагаемые, формализовать структуру которых способами, указанными выше, не удалось.

На третьем этапе выполняется учет влияния слагаемых каждой из перечисленных групп. Применение такого подхода позволяет при решении задачи вместо рассмотренной выше квазиодномерной конечно-элементной модели получить вариант новой, модифицированной квазиодномерной конечно-элементной модели, представляющей собой уже не модель конструкции, а модель задачи в целом. Заметим, что учет слагаемых пятой группы может быть выполнен методом последовательных приближений. Ниже применение этого подхода иллюстрируется при рассмотрении решений ряда задач прикладного характера.

## УЧЕТ СОВМЕСТНОЙ ВИБРАЦИИ ОСНОВНОЙ НЕСУЩЕЙ КОНСТРУКЦИИ И КОНСТРУКТИВНОГО МОДУЛЯ (КМ) С МАЛЫМ РАЙОНОМ СОПРЯЖЕНИЯ

В работе [13] была решена задача о совместной вибрации судового корпуса (основная несущая конструкция) и поля днищевого перекрытия (простейший КМ в виде массы на упругой связи с приложенной вертикальной гармонически изменяющейся силой), сопрягающихся в одной точке. Задача решалась методом последовательных приближений, когда на первом этапе рассчитывались параметры вибрации судового корпуса без влияния присоединения КМ. Затем решались задачи о вибрации КМ при единичном кинематическом возбуждении точки сопряжения и вибрации КМ под действием приложенной к нему внешней нагрузки; эти решения позволяли вычислить значения соответствующих реакций в точке сопряжения моделей. На втором этапе эти реакции прикладывались в точке сопряжения к модели судового корпуса и выполнялся расчет параметров вибрации судового корпуса во втором приближении. Приближения выполнялись до тех пор, пока параметры вибрации судового корпуса в двух последних приближениях не совпадали с точностью, устраивающей исследователя.

Формулирование подхода [11] позволило в работе [14] для решения более общей (многомерной) задачи о совместной вибрации основной несущей конструкции и КМ общей конфигурации (для обеих конструкций применялись квазиодномерные конечно-элементные модели) предложить новую, единую, квазиодномерную конечно-элементную модель, «базовый» элемент которой в точке сопряжения был модифицирован так, что учитывал новые инерционные свойства,

обусловленные присоединением КМ. Таких свойств у исходной модели основной несущей конструкции не было (например, изгибные колебания вызывали появления продольных колебаний и т.п.). Кроме этого, к модифицированной модели основной несущей конструкции в точке сопряжения с КМ прикладывался комплекс внешних усилий, обусловленных внешними усилиями, приложенными к КМ. Естественно, что величины этих инерционных характеристик и, так называемых, «приведенных» усилий были функциями частоты вибрации.

Заметим, что в рамках такого подхода создаваемая модель уже не является моделью какой-либо конструкции, а оказывается моделью общей задачи, учитывающей взаимовлияние исходных моделей. Таким образом подход, предложенный в [11], позволил вместо многомерной задачи о совместной вибрации получить квазиодномерную задачу, модель, алгоритм и программу расчета параметров, вибрации которой незначительно усложнили алгоритм и программу расчета для модели из базовых элементов, изображенных на рис. 1.

## УЧЕТ ВРАЩЕНИЯ ЭЛЕМЕНТОВ КОНСТРУКЦИИ

Проиллюстрируем реализацию предложенного выше подхода [11] в процессе решения задачи из [15] об установившихся колебаниях, возникающих при вращении с постоянной угловой скоростью  $\Omega$  судового валопровода с установленным гребным винтом. Для достаточно жестких валов (надводные корабли, подводные лодки и т.п.) в расчетах вибрации общепринята модель в виде непризматической балки; при этом нейтральная ось такой модели совершает установившиеся колебания с частотой вынуждающего воздействия  $\omega$  относительно своего начального положения; в общем случае указанные частоты могут не совпадать из-за наличия воздействия со стороны иных судовых конструкций.

Будем полагать движение валопровода сложным, состоящим из относительного движения (вращение конструкции с угловой скоростью  $\Omega$  вокруг своей нейтральной оси) и переносного движения (установившиеся колебания с частотой  $\omega$  вместе с нейтральной осью относительно ее начального положения). Для перехода к квазистатической постановке задачи воспользуемся методом кинестатики [16], добавив к внешним силам, действующим на элементы конструкции, силы инерции переносного движения, силы инерции относительного движения и силы инерции Кориолиса. Линейность задачи позволяет рассмотреть независимое действие на конструкцию всех этих видов нагрузки, а общее решение задачи получить в виде суперпозиции решений; при этом каждое из решений может быть получено в наиболее удобной координатной системе.

В наиболее распространенном случае, когда поперечное сечение валопровода представляет собой

совокупность концентрических окружностей, имеют место две особенности, существенно упрощающие решение задачи. Первая из них, обусловленная совпадением центров инерции и жесткости поперечных сечений, приводит к отсутствию инерционных нагрузок относительного движения, а вторая, обусловленная одинаковой жесткостью на изгиб в любом направлении — позволяет искать параметры движения в неподвижной (не вращающейся) координатной системе. Если усилиями, вызывающими вибрацию, являются инерционные усилия, обусловленные неуравновешенностью гребного винта (поворачивающаяся с постоянной угловой скоростью  $\Omega$  вокруг нейтральной оси сила  $Q_0 = m\Omega^2 e$ , где  $m$  — масса винта, а  $e$  — ее эксцентриситет, и изгибающий момент  $M = I_0\Omega^2$ , обусловленный центробежным моментом инерции  $I_0$ ), то их действие может быть учтено [11, 12] коррекцией внешней нагрузки, прикладываемой к квазистатической модели. В неподвижной координатной системе действие такой силы эквивалентно приложению комплексной силы  $\bar{Q} = Q_0 \sin \Omega t + iQ_0 \cos \Omega t$ , где  $i = \sqrt{-1}$ ; действие изгибающего момента учитывается аналогично. Для выполнения такого расчета можно воспользоваться первым вариантом программы [9].

Если на модель действуют дополнительные усилия, гармонически изменяющиеся во времени с частотой  $\omega$ , то решение задачи будет представлять собой суперпозицию решений. Первое из них должно учитывать силы, возникающие вследствие неуравновешенности гребного винта (алгоритм решения предложен выше), а второе — действие на элементы модели дополнительной нагрузки, — сил инерции переносного движения (происходящего вместе с нейтральной осью модели) и сил инерции Кориолиса. Заметим, что действие на элементы модели нагрузки первых двух типов может быть учтено при непосредственном использовании модели и первого варианта программы [8, 9]. Автоматический учет действия сил инерции Кориолиса потребует некоторой модификации используемой ранее модели (т.е. ее оснащение дополнительными свойствами).

Учет сил инерции Кориолиса можно осуществить приложением к элементу «винт» модели валопровода соответствующих составляющих гироскопического момента  $\bar{M}^{sup} = I_\tau \bar{\Omega} \times \bar{\mathcal{G}}$ , которым мы пренебрегали прежде, полагая винт не вращающимся. При этом  $I_\tau = 2I$  — осевой момент инерции масс винта относительно оси  $\tau$  (ось вращения винта) при  $I = I_a = I_b$ ,  $\bar{\Omega}$  — вектор угловой скорости вращения винта,  $\bar{\mathcal{G}}$  — вектор угловой скорости переносного вращения (угловой скорости прецессии).

Рекомендации по коррекции инерционно-жестких характеристик модели, сформулированные выше, позволяют учесть действие таких усилий появлением у модели новых инерционных свойств, а именно: угловая скорость поворота вокруг главной нормали (бинормали) должна порождать момент, направленный в направлении, противоположном бинормали (совпадающем с главной

нормалью). Заметим, что вращение винта с угловой скоростью  $\Omega$  вокруг продольной оси  $\tau$  по часовой стрелке приведет к смене знака этих моментов.

На следующем этапе решения эти дополнительные инерционные свойства будут учтены добавлением на элементе квазистатической модели «винт» упругих связей (спиральные пружины), порождающих соответствующие усилия. Жесткости этих связей должны быть величинами мнимыми (т.к. реактивный момент такой связи пропорционален не углу поворота, а скорости его изменения) и равными:  $c_{bn} = 2I\omega\Omega$  — жесткость пружины, порождающей момент в направлении, противоположном бинормали, величина которого пропорциональна углу поворота относительно главной нормали;  $c_{nb} = -2I\omega\Omega$  — жесткость пружины (отрицательная), порождающей момент в направлении главной нормали, величина которого пропорциональна углу поворота относительно бинормали.

В таком случае алгоритм расчета из [7] следует дополнить комплектом формул из [15], учитывающим изменение парциальных откликов (ПО) и парциальных параметров (ПП) при прохождении этих опор. Очевидно, что такой вывод аналогичен рассмотренному выше.

Для предложенной модели был написан алгоритм расчета на базе дискретного варианта МПО и разработана программа расчета «Винт», подпрограммой которой служила модернизированная программа [9]. Расчеты, выполненные по указанной программе, подтвердили появление у вала с вращающимся винтом эффектов из [17] (прямая и обратная прецессии и т.п.). Рамки настоящего пособия не позволяют более подробно остановиться на обсуждении этого достаточно сложного явления, однако желающие могут ознакомиться с ним в [17].

## ВЛИЯНИЕ ПРОДОЛЬНОЙ СЖИМАЮЩЕЙ КВАЗИСТАТИЧЕСКОЙ СИЛЫ

Как уже было сказано выше, влияние слагаемых четвертой группы может быть учтено непосредственно при выводе формул для ПО и ПП. В качестве первого опыта такого учета в работах [4, 5] был выполнен учет влияния на параметры вибрации плоской квазистатической конечно-элементной модели квазистатической продольной силы. Структуру дополнительных усилий, индуцируемых постоянной по величине и направлению продольной сжимающей силы  $T$ , действующей на элемент модели длиной  $ds$ , можно записать, рассмотрев рис. 7.

При малых деформациях действие этой силы на элемент модели вызывает появление изгибающего момента, включающего две составляющие, т.е.

$$M^T = M_1^T + M_2^T = T \left[ \frac{N_n}{GF} - \mathcal{G} \right] ds. \quad (8)$$

Его первая составляющая  $M_1^T$  обусловлена деформацией сдвига от внутренней перерезывающей силы  $N_n$

( $GF$  — жесткость элемента на сдвиг), а составляющая  $M_2^T$  обусловлена деформацией изгиба элемента на угол  $\mathcal{G}$ . На рис. 4 пунктирными линиями изображено положение элемента при изгибе, а сплошными линиями — его положение с учетом сдвига. Очевидно, что  $M_1^T$  стремится уменьшить угол изгиба элемента и увеличить его поперечное смещение, а  $M_2^T$  стремится увеличить угол изгиба и уменьшить поперечное смещение элемента. При этом, принято следующее правило знаков: поперечное смещение и поперечная сила положительны при направлении вниз, а угол поворота и изгибающий момент положительны в направлении поворота по часовой стрелке.

Заметим, что статическое действие продольной силы должно быть учтено предварительно при расчете положения линии отсчета.

При переходе к дискретной конечно-элементной модели структуры этих дополнительных моментов будут за-

писаны как  $M_1^T = T \frac{N_n}{e_n}$ , где  $e_n$  — жесткость конечного

элемента на сдвиг, и  $M_2^T = Tl\mathcal{G}$ , где  $l$  — длина конечного элемента. Действие изгибающего момента  $M_1^T$ , пропорционального внутренней силе  $N_n$ , выполним непосредственно при выводе формул ПО, учитывающих проход обобщенного шарнира деформаций, допускающего сдвиг, растяжение-сжатие и изгиб:

$$\begin{aligned} A'_{\tau\tau} &= A_{\tau\tau} + \frac{1}{e_\tau}, & A'_{\tau n} &= A_{\tau n} + \frac{T}{e_n} C_{\tau b}, \\ A'_{nn} &= A_{nn} + \frac{1}{e_n} (1 + TC_{nb}), \\ B'_{bn} &= B_{bn} + \frac{T}{e_n} D_{bb}, & D'_{bb} &= D_{bb} + \frac{1}{k}. \end{aligned} \quad (9)$$

Здесь нижние индексы  $i; j$  у ПО означают, что единичное усилие, ориентированное вдоль оси  $j$  вызывает

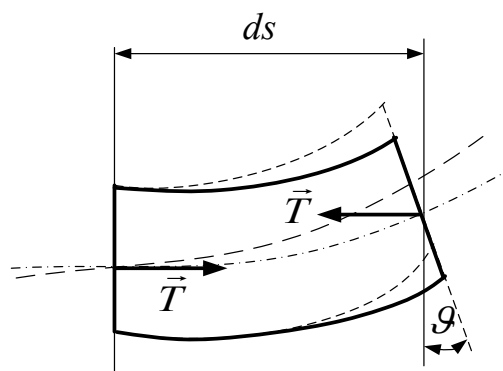


Рис. 7. Схема действия квазистатической сжимающей силы на элемент модели.

Fig. 7. Action diagram of a quasi-static compressive force on a model element.

смещение вдоль оси  $i$ , например,  $A_{\tau n}$  — линейное смещение вдоль оси  $\tau$  от единичной силы, направленной вдоль оси  $n$ ;  $C_{\tau b}; C_{nb}$  — линейное смещение вдоль оси  $\tau$  ( $n$ ) от единичного момента, направленного вдоль оси  $b$ ;  $B_{bn}$  — угол поворота вокруг оси  $b$  от единичной силы, направленной вдоль оси  $n$ ;  $D_{bb}$  — угол поворота вокруг оси  $b$  от единичного момента, направленного вдоль оси  $b$ ;  $e_{\tau}$  — жесткость конечного элемента на растяжение-сжатие, а  $k$  — жесткость элемента на изгиб. Верхний штрих отражает выполнение прохода через шарнир деформаций.

Действие отрицательного изгибающего момента  $M_2^T$ , пропорционального абсолютному значению угла поворота элемента вокруг оси  $b$ , выполним, в соответствии с [11], коррекцией момента инерции масс, определяющего инерцию вращения элемента вокруг оси  $b$ . Ранее для квазистатической модели ПКУДС это усилие порождала опора в виде пружины отрицательной жесткости, равной  $u_b = -I_b \omega^2$ , где  $I_b$  — момент инерции масс элемента относительно бинормали  $b$ , а  $\omega$  — частота вибрации; теперь жесткость такой опоры следует *откорректировать* и принять равной  $u_b^* = -(I_b \omega^2 + Tl)$ . Комплект формул для прохода такой опоры приведен в [5].

Заметим, что учет продольной квазистатической силы дал возможность не только оценить ее влияние на параметры вибрации [18], но и найти предельные значения сжимающей силы, при которой квазиодномерная модель теряет устойчивость. Очевидно, что при  $\omega = 0$  мы будем получать для модели значение критической силы Эйлера.

Изменения алгоритма расчета позволили внести соответствующие изменения в [7].

Отметим, что в работах [5, 7], выполненных в середине 80-х годов, учет момента  $M_2^T$  выполнялся в рамках непосредственного вывода формул для ПО. Такой учет привел к более громоздким выкладкам, чем учет коррекции инерционной характеристики, предложенный выше.

## УЧЕТ ДВИЖЕНИЯ ЖИДКОСТИ В НЕПРИЗМАТИЧЕСКОМ ПРЯМОЛИНЕЙНОМ ТРУБОПРОВОДЕ

В качестве очередного примера применения предложенного подхода [11], была решена задача из [19] о вибрации прямолинейного трубопровода, по которому с заданной скоростью движется идеальная жидкость. В качестве физической модели трубопровода был использован плоский вариант квазиодномерной конечно-элементной модели. При разработке математической модели задачи применен метод кинетостатики [16]; при таком подходе к действующим на механическую систему (трубопровод и жидкость) задаваемым гармонически изменяющимся во времени усилиям следует добавить соответствующие силы инерции, а модель трубопровода можно рассматривать как находящуюся в равновесии. Рассмотрение процесса вынужденных установившихся

колебаний (вибрации), при котором все параметры изменяются во времени по моногармоническому закону, позволяет при получении математической модели воспользоваться квазистатической аналогией [1, 3, 4, 6, 10]. Задача о вычислении параметров движения системы сводится к задаче о вычислении параметров её деформированного состояния при статическом действии амплитудных значений вынуждающих усилий. Выполнение расчетов в комплексных числах позволит учесть наличие внутренних и внешних линейно-вязких сопротивлений комплексностью характеристик жесткости квазистатической модели [1, 3, 4, 6, 10]. Анализ выражений для составляющих сил инерции позволил сделать следующие выводы:

- изменение массы элемента модели трубопровода на величину массы расположенного внутри него элемента жидкости приведет к *коррекции* величины соответствующей инерционной характеристики (его массы) и, как следствие, к *коррекции* отрицательной жесткости соответствующей упругой опоры квазистатической модели трубопровода;
- учет сил инерции Кориолиса требует оснащения используемой квазиодномерной модели ранее отсутствовавшим свойством — поворот элемента вокруг бинормали должен вызывать появление поперечной силы, пропорциональной угловой скорости этого поворота.

Очевидно, что оснащение модели трубопровода опорой с такими свойствами приведет к *модификации* инерционных свойств ее элементов, что, в свою очередь, приведет к введению в каждый базовый элемент квазистатической модели упругой опоры, поперечная реакция которой будет зависеть от угла поворота элемента. При этом жесткость этой опоры будет величиной мнимой, т.к. возникающая поперечная сила зависит от скорости изменения угла поворота элемента. С формулами для вычисления ПО и ПП рассмотренных нагрузок можно ознакомиться в [20].

Действие слагаемого, содержащего радиус кривизны нейтральной оси прямолинейного трубопровода, был учтен *непосредственно при выводе формул* для парциальных откликов и парциальных параметров при «прохождении» подэлемента длиной  $l$ . С формулами для вычисления ПО и ПП рассмотренных нагрузок можно ознакомиться в [21]. Полученные выражения позволили выполнить очередную модернизацию расчетной программы [9].

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В предложенном материале изложен подход, позволяющий в случае моделирования конструкций системами квазиодномерных конечно-элементных моделей, рассчитывать параметры их статического деформирования и (или) связанных изгибно-продольно-крутильных установившихся колебаний (вибрации) более просто и быстро. Применение предложенного подхода проиллюстрировано на ряде задач прикладного характера.



## ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ИНФОРМАЦИЯ

**Вклад авторов.** Армен Л. Мелконян — написание текста рукописи, редактирование текста рукописи, создание изображений, экспертная оценка, утверждение финальной версии рукописи; Дмитрий А. Николаев — поиск публикаций по теме статьи, редактирование текста рукописи, создание изображений, утверждение финальной версии рукописи. Все авторы одобрили рукопись (версию для публикации) и согласились нести ответственность за все аспекты работы, гарантируя надлежащее рассмотрение и решение вопросов, связанных с точностью и добросовестностью любой ее части.

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

**Конфликт интересов.** Авторы гарантируют 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 использовались.

**Рассмотрение и рецензирование.** Настоящая работа подана в журнал в инициативном порядке и рассмотрена по обычной процедуре.

В рецензировании участвовали один рецензент, член редакционной коллегии и научный редактор издания.

## ADDITIONAL INFORMATION

**Author contributions:** Armen L. Melconian: writing—original draft, writing—review & editing, visualization, expert review, validation; Dmitry A. Nikolaev: investigation, writing—review & editing, visualization, validation. All the authors approved the version of the manuscript to be published and agree 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:** No funding.

**Disclosure of interests:** The authors have no relationships, activities, or interests for the last three years related to for-profit or not-for-profit third parties whose interests may be affected by the content of the article.

**Statement of originality:** No previously obtained or published material (text, images, or data) was used in this study or article.

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

**Provenance and peer review:** This paper was submitted unsolicited and reviewed following the standard procedure. The peer review process involved one reviewer, a member of the editorial board, and the in-house scientific editor.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Александров В.Л., Матлах А.П., Поляков В.И. Борьба с вибрацией на судах. СПб.: МорВест, 2005. EDN: QNSOHV
2. Постнов В.А., Хархурим И.Я. Метод конечных элементов в строительной механике корабля. Л.: Судостроение, 1974.
3. Чувиковский В.С. Численные методы в строительной механике корабля. Л.: Судостроение, 1976.
4. Мелконян А.Л. Математическая модель для исследования связанных изгибно-продольных вынужденных колебаний плоско-криволинейной упругой конструкции при наличии статической продольной нагрузки. Деп. ВИНТИ, 1987. № 7692-B87.
5. Мелконян А.Л. Алгоритм расчета связанных изгибно-продольных вынужденных установившихся колебаний плоско-криволинейной упругой дискретной системы при наличии статической продольной нагрузки. Деп. ВИНТИ, 1988. № 367-B88.
6. Николаев Д.А. Математическая модель пространственных изгибно-продольно-крутильных колебаний корпуса как непрямоугольной балки с криволинейными несовпадающими линиями центров жесткости на изгиб и кручение. В кн.: Труды ЛКИ. Применение численных методов в расчетах судовых конструкций. 1986. С. 50–55.
7. Николаев Д.А. Алгоритм расчета связанных изгибно-продольно-крутильных колебаний пространственно-криволинейных упругих систем. Деп. ЦНИИ РУМБ, 1986. № ДР 2494.
8. Мелконян А.Л., Николаев Д.А. Квазидномерные модели для анализа параметров вибрации судового корпуса на ранних стадиях его проектирования // Морские интеллектуальные технологии. 2019. № 2(44). С. 45–51. EDN: WADFQY
9. Расчёт балок и рам. Использование метода парциальных откликов. [internet] Дата обращения: 17.11.2024. Режим доступа: <http://www.d-nik.de>
10. Мелконян А.Л., Черныш А.А. Колебания линейных механических систем. Л.: СПбГМТУ, 2019.
11. Мелконян А.Л., Николаев Д.А. Модификация инерционно-жесткостных характеристик модели как путь решения задач о ее установившихся колебаниях // Морские интеллектуальные

- технологии. 2020. № 1(47). С. 12–19. doi: 10.37220/MIT.2020.47.1.037 EDN: DWZCCE
12. Бабанин Н.В., Мелконян А.Л. Комплексное представление усилий при расчете параметров вынужденных установившихся колебаний // Труды СПбГМТУ. 2024. № 1(9). С. 14–23. EDN: LQKHKK
  13. Чувиковский В.С., Мелконян А.Л. Совместная вынужденная вибрация судового корпуса и его перекрытий // Судостроение. 1986. №8 (585). С. 5–6.
  14. Мелконян А.Л., Николаев Д.А. Совместная вибрация судового корпуса и конструктивного модуля с малым районом сопряжения // Морской Вестник. 2022. № 1(81). С. 24–26. EDN: GVHBYK
  15. Гежа Д.В., Мелконян А.Л., Николаев Д.А. Расчет параметров вибрации валопровода с учетом вращения гребного винта // Труды Крыловского государственного научного центра. 2022. № S1. С. 105–112. doi: 10.24937/2542-2324-2022-1-S-1-105-112 EDN XCFQBF
  16. Бутенин Н.В., Лунц Я.Л., Меркин Д.Р. Курс теоретической механики. В 2-х т. СПб: Лань, 2023.
  17. Диментберг Ф.М. Изгибные колебания вращающихся валов. М.: Изд-во Академии Наук СССР, 1959
  18. Гежа Д.В., Мелконян А.Л., Николаев Д.А. Оценка влияния силы упора вращающегося винта на параметры вибрации валопровода // Морские интеллектуальные технологии. 2022. № 2-2(56). С. 53–58. doi: 10.37220/MIT.2022.56.2.041 EDN RZLDKY
  19. Светлицкий В.А., Стасенко И.В. Сборник задач по теории колебаний. Москва: Высшая школа, 1979.
  20. Мелконян А.Л., Николаев Д.А., Чулкин М.В. Расчет параметров вынужденных установившихся колебаний трубопровода // Морские интеллектуальные технологии. 2021. № 1-2(51). С. 51–59. doi: 10.37220/MIT.2021.51.1.025 EDN WSAQAM
  21. Мелконян А.Л., Николаев Д.А., Яремчук С.А. Расчет параметров вибрации трубопровода без выполнения последовательных приближений // Морские интеллектуальные технологии. 2024. № 3-2(65). С. 94–101. doi: 10.37220/MIT.2024.65.3.012 EDN XMYMPW

## REFERENCES

1. Aleksandrov VL, Matlah AP, Poljakov VI. *Combating vibration on ships*. Sankt Petersburg: MorVest; 2005. (In Russ.) EDN: QNSOHV
2. Postnov VA, Xarkhurim IY. *Finite element method in calculations of ship structures*. Leningrad: Sudostroenie; 1974. (In Russ.)
3. Chuvikovskij VS. *Numerical methods of calculations in ship structural mechanics*. Leningrad: Sudostroenie; 1976. (In Russ.)
4. Melkonian AL. Mathematical model for the study of coupled flexural-longitudinal forced vibrations of a plane-curvilinear elastic structure in the presence of a static longitudinal load. VINITI; 1987. 692-V87. (In Russ.)
5. Melkonian AL. Algorithm for calculating coupled flexural-longitudinal forced steady oscillations of a plane-curvilinear elastic discrete system in the presence of a static longitudinal load. VINITI; 1988. 367-V88. (In Russ.)
6. Nikolaev DA. Mathematical model of spatial bending-longitudinal-torsional vibrations of the body as a non-prismatic beam with curved non-coinciding lines of the centers of rigidity for bending and torsion. *Trudy LKI*. 1986;50–55. (In Russ.)
7. Nikolaev DA. Algorithm for calculating coupled bending-longitudinal-torsional vibrations of spatially curvilinear elastic systems. CSRI Rumb; 1986. № DR 2494. (In Russ.)
8. Melkonian AL, Nikolaev DA. Quasi-one-dimensional models for the analysis of ship hull vibration parameters at early stages of its design. *Morskie intellektual'nye tehnologii*. 2019;2(44):44–51. (In Russ.) EDN: WADFQY
9. Calculation of beams and frames. Using the partial response method. [internet] Accessed: 17.11.2024. Available from: <http://www.d-nik.de>
10. Melkonjan AL, Chernish AA. *Vibrations of linear mechanical systems*. Sankt Petersburg: SPbGMTU; 2019. (In Russ.)
11. 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):12–20. (In Russ.) doi: 10.37220/MIT.2020.47.1.037 EDN: DWZCCE
12. Babanin NV, Melkonyan AL. Complex representation of efforts in calculating the parameters of forced steady-state vibrations. *SMTU Transactions*. 2024;1(9):14–23. (In Russ.) EDN: LQKHKK
13. Chuvikovskij VS, Melkonjan AL. Combined forced vibration of the ship's hull and its floors. *Sudostroyeniye*. 1986;8(585):5–6. (In Russ.)
14. Melkonian AL, Nikolaev DA. Joint vibration of the ship's hull and structural modules with a small interface area. *Morskoy Vestnik*. 2022;1(81):53–58. (In Russ.) EDN: GVHBYK
15. Gezha DV, Melkonyan AL, Nikolaev DA. Calculation of vibration parameters of the shaft line taking into account the rotation of the propeller. *Transactions of the krylov state research centre*. 2022;S1:105–112. (In Russ.) doi: 10.24937/2542-2324-2022-1-S-I-105-112 EDN XCFQBF
16. Butenin NV, Lunts YL, Merkin DR. *Course of theoretical mechanics*. 2 vols. Sankt Petersburg: Lan'; 2023. (In Russ.)
17. Dimentberg FM. *Bending vibrations of rotating shafts*. Moscow: AN SSSR; 1959. (In Russ.)
18. Gezha DV, Melkonyan AL, Nikolaev DA. Evaluation of the influence of the thrust force rotating screw on vibration parameters shafting. *Morskie intellektual'nye tehnologii*. 2022;2(56):53–58. (In Russ.) doi: 10.37220/MIT.2022.56.2.041 EDN RZLDKY
19. Svetlickij VA, Stasenko IV. *Collection of problems on the theory of oscillations*. Moscow: Vysshaja shkola; 1979. (In Russ.)
20. 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
21. Melkonyan 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

## ОБ АВТОРАХ

**\* Мелконян Армен Леонович,**

канд. техн. наук, доцент, профессор кафедры теоретической механики и сопротивления материалов, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет;  
адрес: Россия, 190121, Санкт-Петербург, ул. Лощманская, д. 3;  
eLibrary SPIN: 3789-4157;  
e-mail: mel1950@mail.ru

**Николаев Дмитрий Александрович,**

канд. техн. наук, пенсионер;  
e-mail: D.Nikolaev@d-nik.de

## AUTHORS' INFO

**\* Armen L. Melconian,**

Cand. Sci. (Engineering), associate professor, professor of theoretical mechanics and material strength department, Saint Petersburg State Marine Technical University;  
address: 3 Lotsmanskaya st, Saint Petersburg, 190121, Russia;  
eLibrary SPIN: 3789-4157;  
e-mail: mel1950@mail.ru

**Dmitry A. Nikolaev,**

Cand. Sci. (Engineering), pensioner;  
e-mail: D.Nikolaev@d-nik.de

\* Автор, ответственный за переписку / Corresponding author

Оригинальное исследование

УДК 621.9.048.7: 621.375.826: 621.373.8

DOI: [https://doi.org/10.52899/24141437\\_2025\\_03\\_291](https://doi.org/10.52899/24141437_2025_03_291)

EDN: JAFYZG

# О влиянии параметров импульсов на интенсивность удаления органических слоев с углеродистой стали и других материалов при пиролизной очистке с использованием наносекундных технологических лазеров

О.Г. Девойно, Д.А. Шпакевич, А.В. Горбунов, А.С. Лапковский, Л.И. Пилецкая, А.Ю. Рудницкий

Научно-исследовательский политехнический институт — филиал Белорусского национального технического университета, Минск, Республика Беларусь

## АННОТАЦИЯ

**Актуальность.** Статья посвящена исследованию в области технологий импульсной лазерной очистки (ЛО), актуальной для современных металлообрабатывающих производств.

**Цель работы** — получить новые данные для описания (на полуколичественном уровне) связи между выходными параметрами ЛО и набором регулируемых режимных параметров этих процессов, с использованием методов экспериментального исследования по удалению слоев органических материалов с металлических образцов с применением импульсного лазера мощностью до 200 Вт и параметрического анализа его результатов, а также аналогичных экспериментальных данных, полученных ранее в сходных исследованиях с лазерами с наносекундными импульсами.

**Материалы и методы.** Проведена серия опытов по ЛО стальных образцов от пленок краски и слоя резиносодержащих загрязнений (образующихся в шинном производстве), с варьированием параметров лазеров и определением производительности ЛО, энергозатрат и некоторых характеристик, влияющих на разрушение органического слоя.

**Результаты.** Анализ результатов в сочетании с данными аналогичных работ по ЛО показал сложный многофакторный характер связи входных режимных параметров с выходными, а также то, что одними из наиболее явно (и прямо пропорционально) влияющих на интенсивность очистки металлов параметров являются длительность импульса  $t_p$  и коэффициент заполнения  $DC$ . В оптимальных режимах энергозатраты на ЛО близки к 13 МДж/(дм<sup>3</sup> слоя) в варианте с ЛО эластомерсодержащего слоя. Поверхность образцов из Ст3 при такой ЛО не подвергается заметной эрозии и ее микротвердость находится на уровне  $\leq 180$  HV, что близко к этому показателю для исходной стали.

**Заключение.** В дальнейших НИОКР целесообразным будет выбирать параметры для реализации процессов ЛО с учетом механизма удаления слоя, которое, по предварительной оценке, в режимах с невысокими энергозатратами идет с сочетанием энергоемкой термообработки (пиролиза) и механизма отслоения покрытия за счет роста термоупругих напряжений в нем.

**Ключевые слова:** очистка поверхности металла; удаление органических слоев; наносекундные лазеры; пиролиз; краска; длительность импульсов; коэффициент заполнения; энергозатраты.

## Как цитировать

Девойно О.Г., Шпакевич Д.А., Горбунов А.В., Лапковский А.С., Пилецкая Л.И., Рудницкий А.Ю. О влиянии параметров импульсов на интенсивность удаления органических слоев с углеродистой стали и других материалов при пиролизной очистке с использованием наносекундных технологических лазеров // Труды Санкт-Петербургского государственного морского технического университета. 2025. Т. 4, № 3. С. 291–301. DOI: 10.52899/24141437\_2025\_03\_291 EDN: JAFYZG

Original Study Article

DOI: [https://doi.org/10.52899/24141437\\_2025\\_03\\_291](https://doi.org/10.52899/24141437_2025_03_291)

EDN: JAFYZG

# The Effect of Pulse Parameters on Intensity of Removal of Organic Layers From Carbon Steel and Other Materials During Pyrolysis Using Nanosecond Industrial Lasers

Oleg G. Devoino, Dmitry A. Shpakevich, Andrei V. Gorbunov, Alexander S. Lapkovsky, Lyudmila I. Piletskaya, Andrei Yu. Roudnitsky

Research Polytechnic Institute — Branch of Belarusian National Technical University, Minsk, Republic of Belarus

## ABSTRACT

**BACKGROUND:** The article investigates pulsed laser cleaning (LC) technologies relevant for contemporary metalworking industries.

**AIM:** To obtain new data for describing (at a semi-quantitative level) the relationship between LC output parameters and a set of adjustable operating parameters of these processes by experimental research of removing organic layers from metal samples using an up to 200 W pulsed laser, parametric analysis, and similar experimental data obtained earlier in similar studies with nanosecond lasers.

**METHODS:** A series of experiments on LC of steel samples from paint films and a layer of rubber-containing contaminants (generated in tire production) was carried out with varying laser parameters and determining the LC performance, energy consumption, and some parameters affecting the destruction of the organic layer.

**RESULTS:** An analysis of the results in combination with data from similar LC operations showed the complex multifactorial relationship between the input and the output operating parameters. In addition, it demonstrated that one of the most clearly (and directly proportional) parameters affecting the intensity of metal cleaning are the pulse duration  $t_p$  and the duty cycle  $DC$ . In optimal conditions, the LC energy consumption is close to 13 MJ/(dm<sup>3</sup> layer) in the LC option of elastomer-containing layer. In this LC option, the surface of St3 samples does not have noticeable erosion and its microhardness is approximately  $\leq 180$  HV, which is close to this parameter of the initial steel.

**CONCLUSION:** In further R&D, it will be advisable to select LC parameters based on the layer removal mechanism, which, according to preliminary estimates, in low energy consumption conditions comes with combination of energy-intensive thermal ablation (pyrolysis) and the coating exfoliation due to higher thermoelastic stresses in it.

**Keywords:** metal surface cleaning; removal of organic layers; nanosecond lasers; pyrolysis; paint; pulse duration; duty cycle; energy consumption.

## To cite this article

Devoino OG, Shpakevich DA, Gorbunov AV, Lapkovsky AS, Piletskaya LI, Roudnitsky AYu. The Effect of Pulse Parameters on Intensity of Removal of Organic Layers From Carbon Steel and Other Materials During Pyrolysis Using Nanosecond Industrial Lasers. *Transactions of the Saint Petersburg State Marine Technical University*. 2025;4(3):291–301. DOI: 10.52899/24141437\_2025\_03\_291 EDN: JAFYZG

## ВВЕДЕНИЕ

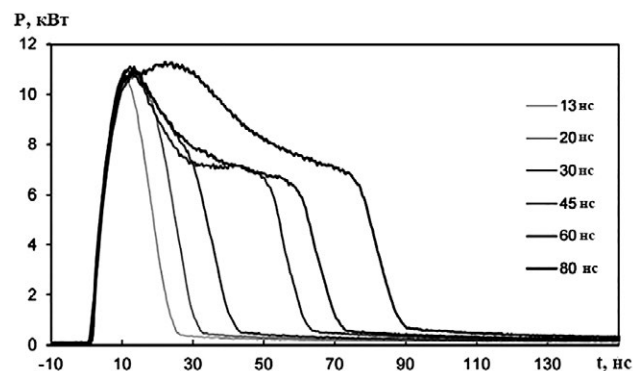
Как показано во многих работах, ЛО (лазерная очистка, т. е. удаление) органических слоев и покрытий — это сложный быстропротекающий процесс, ход которого определяется физическими параметрами многофазной среды, возникающей в зоне лазерного воздействия (характеризующейся энергетическим вкладом до 1–3 МДж/м<sup>2</sup> и выше), и может изменяться за счет управления входными режимными параметрами ЛО. Для ЛО часто применяются импульсные лазеры с диапазоном длительности импульса ( $t_p$ ) от миллисекунд до наносекунд [1–12]. При этом удаление органических слоев может идти двумя основными способами: (а) прямое удаление материала с поверхности, если длина волны лазера достаточно хорошо поглощается материалом слоя/покрытия, или (б) не прямое удаление, когда лазерное излучение (ЛИ) поглощается металлической подложкой на границе раздела покрытие/металл [1], где нагрев вызывает термоупругие напряжения или другие эффекты, приводящие к отслаиванию и диспергированию материала покрытия. В ряде исследований по ЛО признается, что ключевой момент для эффективного процесса — это выбор оптимальных входных параметров. В частности, в работах [1, 3–5, 12–15] показано, что режимные параметры ЛО, в т. ч.  $t_p$  (варьировалась в диапазоне 1–2000 нс), частота импульсов ЛИ  $f$  (варьировалась от 10 Гц до 30 МГц), их энергия  $E_p$  (в диапазоне от 10<sup>-3</sup> до 100 мДж), лазерный флюенс  $F$  и некоторые другие могут существенно влиять на уровень выходных параметров обработки. При эффективном лазерном процессе по теоретическим и экспериментальным данным возможно повышение эффективности удаления слоя за счет снижения энергозатрат на единицу его площади поверхности ( $S$ ) и единицу объема. В целом, следует отметить, что опубликованные данные в области ЛО органических слоев, в т. ч. лакокрасочных покрытий (ЛКП) с применением импульсных наносекундных лазеров (высокоперспективных для промышленных целей, как наиболее используемых пока в технологиях очистки поверхностей сталей и сплавов) [1–13, 15] носят несколько противоречивый характер и не содержат достаточного объема детальных данных по влиянию входных технологических параметров лазерной системы на такие важные выходные параметры

процессов ЛО, как удельная производительность по очищаемой площади и энергозатраты на ЛО.

В связи с этим нами была поставлена, а также некоторыми физическими характеристиками процесса, — на примере ЛО стальных образцов с полимерсодержащими слоями на них.

## МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ИССЛЕДОВАНИЯ

Для проведения эксперимента использовался аппарат лазерной очистки HS-LC200 (КНР) с параметрами: средняя выходная мощность — 205 Вт, длина волны лазера  $\lambda = 1,070$  мкм, максимальная энергия импульса ЛИ — 5,0 мДж, диапазон регулирования частоты  $f$  — 1–3000 кГц, диапазон регулирования длительности импульса  $t_p$  — 13–500 нс. Форма импульса излучения в различных режимах работы лазера приведена на рис. 1.



**Рис. 1.** Форма импульса лазерного излучения (т. е. изменение выходной мощности (приведена в кВт) во времени (оно обозначено в наносекундах)) при различной его длительности (для шести вариантов в интервале  $t_p$  от 13 до 80 нс) для использованной нами системы импульсной лазерной очистки HS-LC200 (КНР) со средней по времени тепловой мощностью излучения  $N \geq 200$  Вт и с длительностью импульса  $t_p \leq 500$  нс. Зависимости для формы импульса приведены по данным фирмы-производителя лазерной системы.

**Fig. 1.** Laser pulse waveform (i.e. the change in output power [kW] over time [nanoseconds]) with different durations (for six variants in the range  $t_p$  from 13 to 80 ns) for the HS-LC200 pulse laser cleaning system (China); time-average thermal radiation power  $N \geq 200$  W, pulse duration  $t_p \leq 500$  ns. Dependencies for the pulse waveform are taken from the laser system's manufacturer data.

**Таблица 1.** Выражения для некоторых входных режимных параметров импульсной лазерной очистки

**Table 1.** Expressions for some input processing parameters of pulsed laser cleaning

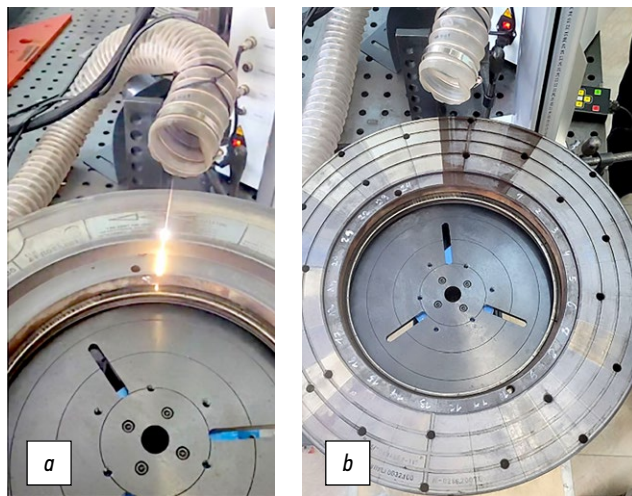
Обозначение	Величина	Единицы измерения	Базовое выражение
$t_p$	Длительность импульса ЛИ	с	$t_p = DC/f$
$f$	Частота импульсов ЛИ	Гц	$f = DC/t_p$
$DC$	Коэффициент заполнения (обратная скважность)	безразмерный	$DC = f \cdot t_p$
$N$	Мощность	Вт	$N_{peak} = E_p / t_p$ ; $N_{avg} = N_{peak} \cdot DC = E_p \cdot f$
$E_p$	Энергия единичного импульса	Дж	$E_p = N_{peak} \cdot t_p = N_{avg} / f$
$P$	Удельная мощность на единицу очищаемой поверхности	Вт/см <sup>2</sup>	$P = N/S$ ; $P_{peak} = F/t_p$ ; $P_{avg} = P_{peak} \cdot DC = F \cdot f$

На рис. 2 показан пример вида очищаемой поверхности в ходе экспериментальной серии по ЛО от органических слоев. В табл. 1 нами приведены выражения для определения некоторых важных режимных параметров, задаваемых как входные в экспериментах с использованием импульсных лазеров [13].

Интенсивность газификации (испарения) органического слоя (например, ЛКП) с металлической подложки при лазерной абляции (в  $\text{кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$ ) приближенно можно найти с помощью уравнения Герца–Кнудсена (в известной форме [8, 16]) — как скорость адсорбции/десорбции на границе пар/поверхность, что является функцией давления насыщенных паров  $p_{sat}$  у плоской поверхности (с температурой  $T$ ) и других параметров пара и конденсированной фазы (в т.ч. ее коэффициента испарения-конденсации):

$$G_V \approx 0,82 \left( \frac{m}{2\pi k_B T} \right)^{1/2} p_{sat}(T), \quad (1)$$

где  $p_{sat}(T) = P_0 \exp \left[ \frac{m \Delta H_v}{k_B} \left( \frac{1}{T_v} - \frac{1}{T} \right) \right]$ ,  $P_0$  — стандартное атмосферное давление,  $m$  — масса молекулы испаряющегося вещества (в случае ЛО смеси  $\text{CO}$ ,  $\text{H}_2$ ,  $\text{CH}_4$ ,  $\text{H}_2\text{O}$ ),  $k_B$  — постоянная Больцмана,  $\Delta H_v$  — энтальпия и  $T_v$  — температура испарения, соответственно.



**Рис. 2.** Фотографии поверхности со слоем остаточных органических продуктов от нагрева эластомерного материала на вулканизационной форме из стали 40X с диаметром 556 мм (применяемой в шинном производстве на ОАО «Белшина») в ходе проведения нами лазерной очистки и после нее: *a* — вид изделия в ходе эксперимента по лазерной очистке; *b* — очищенная после лазерной очистки поверхность, в верхней части снимка из изделия оставлен неочищенный от исходных органических веществ конусный сектор (он виден по резкой границе серой окраски).

**Fig. 2.** Photos of a surface with a residual organic layer produced by heating the elastomer on a 40X steel mould with a diameter of 556 mm (used in tire production at Belshina JSC) during and after laser cleaning: *a*, view of the product during the laser cleaning experiment; *b*, clean surface after laser cleaning. The top view shows a conical sector of the product with the original organic substance (visible as the sharp gray boundary).

К числу пригодных для оценки производительности и интенсивности процессов ЛО от органических слоев или пленок относится и такой параметр, как приближенная скорость удаления органической пленки с металла при импульсной ЛО  $G_{ts}$  (в  $\text{м}^3/\text{с}$ ) [7] (в режиме с преобладанием динамического механизма очистки (генерация термоупругих напряжений для разрушения слоя (без его испарения) или отслоения его от основы)):

$$G_{ts} = \left( \frac{E}{\rho} \right)^{1/2} \left( \frac{\alpha \cdot E_p}{\rho \cdot c_p \cdot \delta} \right). \quad (2)$$

В выражении (2) использованы физические свойства удаляемого слоя:  $E$  (в Па) — модуль упругости (модуль Юнга),  $\alpha$  (в  $\text{K}^{-1}$ ) — коэффициент линейного термического расширения, и  $\rho$  и  $c_p$  — плотность слоя и его удельная теплоемкость, соответственно. Также в выражении (2) учтены параметры режима лазерной обработки, в т.ч. энергия импульса ЛИ ( $\epsilon$ ) в Дж и исходная толщина удаляемого органического слоя ( $\delta$ ) в метрах.

Амплитуда давления (в Па) фронта квазисферической ударной волны (УВ) в лазерной плазме в процессе ЛО может быть оценена, например, по варианту из [17]):

$$P \approx \Delta P = \frac{8}{25} \left( \frac{1}{\gamma + 1} \right) \left( \frac{E_p}{R_s^3} \right) Y^4, \quad (3)$$

где  $\gamma$  — показатель адиабаты газа в зоне УВ (воздуха в нашем случае,  $\gamma = c_p/c_v = 1,40$  (при 293 К и 0,101 МПа)),  $Y = f(\gamma) = 1,03$  по данным [17]. Использовано также выражение [17] для определения радиуса УВ (в метрах), индуцируемой импульсом ЛИ:

$$R_s = t_p^{2/5} \cdot \left( \frac{E_p}{\rho_1} \right)^{1/5} \cdot Y(\gamma), \quad (4)$$

где  $t_p$ ,  $E_p$  — длительность и энергия импульса,  $\rho_1$  — плотность газа (нагретого в УВ) [18].

## РЕЗУЛЬТАТЫ, ИХ АНАЛИЗ И ОБСУЖДЕНИЕ

Нами была выполнена серия опытов в режимах лазерного удаления со стальных образцов пленки ЛКП (алкидного типа) и слоя резиносодержащих загрязнений (образующихся на технологической оснастке в шинном производстве ОАО «Белшина», Бобруйск), с варьированием набора параметров импульсов лазера с длиной волны  $\lambda \approx 1064$  нм и с определением уровня удельной производительности процесса очистки и энергозатрат в различных режимах, а также некоторых существенных физических характеристик (удельной мощности импульса излучения  $P_p$  и размера облака лазерно-индуцируемой приповерхностной плазмы  $R_{sw}$ ), по-видимому, влияющих на механизм разрушения органического слоя.

Параллельно с экспериментами по ЛО (результаты их приведены в табл. 2) мы провели систематизацию и анализ некоторых современных опубликованных данных по характеристикам выходных параметров ЛО органических слоев на нескольких видах металлов при варьировании режимных параметров ЛО-процесса с импульсными ОКГ,

определяющих специфику их импульсов, в частности, коэффициент заполнения (обратную скважность) [2] и энергию единичного импульса ЛИ  $E_p$ . Их результаты представлены в табл. 3. Далее на рис. 3 и 4 показана морфология некоторых образцов со слоем ЛКП до и после удаления нами этих слоев.

**Таблица 2.** Сравнение измеренных экспериментальных характеристик (и производных от них параметров) для различных режимов удаления органических слоев со стальных поверхностей (марок Ст3 и 40X), с использованием импульсных наносекундных лазеров

**Table 2.** Comparison of measured experimental characteristics (and parameters derived from them) for different parameters of organic layer removal from steel surfaces (St3 and 40X) using pulsed nanosecond lasers

№	$t_p$ , нс	$f$ , кГц	$DC$ , с/с	$E_p$ , мДж	$DC \cdot t_p$ , нс	$E'$ , МДж/дм <sup>3</sup>	$G_j$ , см <sup>2</sup> /с	$R_{sw}$ , мм	$P_p$ , (Вт/см <sup>2</sup> )-10 <sup>-6</sup>
1 — очистка синего ЛКП (алкидного с $\delta = 120 \pm 20$ мкм) на углеродистой стали Ст3, с лазерной системой HS-LC200	13	700	0,0091	0,29	0,1183	59,94	0,95 (при $\alpha \approx 0,30$ )	0,14	31,9
2 — то же	13	700	0,0091	0,30	0,1183	52,63	0,95 (при $\alpha \approx 0,35$ )	0,14	32,65
3 — то же	80	164	0,0131	1,25	1,048	18,93	0,95 (при $\alpha \approx 0,95$ )	0,38	22,1
4 — то же	200	64	0,0128	3,20	2,56	17,98	0,95 (при $\alpha = 1$ )	0,66	22,7
5 — очистка пресс-формы для шин от резино-содержащих загрязнений (с $\delta \approx 70$ мкм) на поверхности стали 40X	200	165	0,0330	1,24	6,6	22,88	1,28 (при $\alpha \approx 1$ )	0,54	8,79
6 — то же	500	165	0,0825	1,24	41,25	12,70	2,30 (при $\alpha = 1$ )	0,79	3,52
7 — то же	80	165	0,0132	1,24	1,056	22,88	1,28 (при $\alpha = 1$ )	0,38	22,0
8 — то же	200	600	0,1200	0,342	24,0	12,70	2,30 (при $\alpha = 1$ )	0,42	2,42
9 — то же	80	180	0,0140	1,14	1,12	22,88	1,28 (при $\alpha = 1$ )	0,37	20,1

Обозначения в таблицах 2 и 3:  $DC$  — «Duty cycle» (коэффициент заполнения) при ЛО ( $DC = 1/S_p$ , где  $S_p$  — скважность при импульсной ЛО ( $S_p = t_0/t_p$  — отношение длительности межимпульсной паузы (точнее, интервала между амплитудными моментами двух соседних импульсов) к длительности импульса ЛИ в ходе технологического цикла ЛО));  $E'$  — удельные энергозатраты на единицу облучаемой поверхности, определяемые по удельному времени цикла при ЛО единицы поверхности  $t_{cycle}$  и по  $N$  (в соответствии с [1]);  $G_j$  — интегральная поверхностная скорость ЛО («выходная», т. е. с учетом повторных проходов луча по поверхности, если они были); \* — пятно ЛИ квадратной формы;  $\alpha$  — степень удаления объема органического слоя с поверхности металла в данном режиме ЛО (в %/%) ;  $E_p$  — амплитудная энергия импульса ЛИ;  $R_{sw}$  — приближенный радиус квазисферической ударной волны в лазерной плазме, возможной при ЛО;  $P_p$  — удельная мощность (на единицу площади пятна излучения на поверхности материала) в момент действия импульса ЛИ.



**Рис. 3.** Макроморфология участков (площадью по 4 см<sup>2</sup>) с лакокрасочного покрытия алкидного типа (со средней толщиной 120 мкм), сфотографированных до и после лазерной очистки в режимах с разными параметрами: *a* — поверхность лакокрасочного покрытия до лазерной очистки; *b* — частично очищенная поверхность после лазерной очистки в режиме 2 по табл. 2; *c* — полностью очищенная часть поверхности после лазерной очистки в режиме 4 по табл. 2.

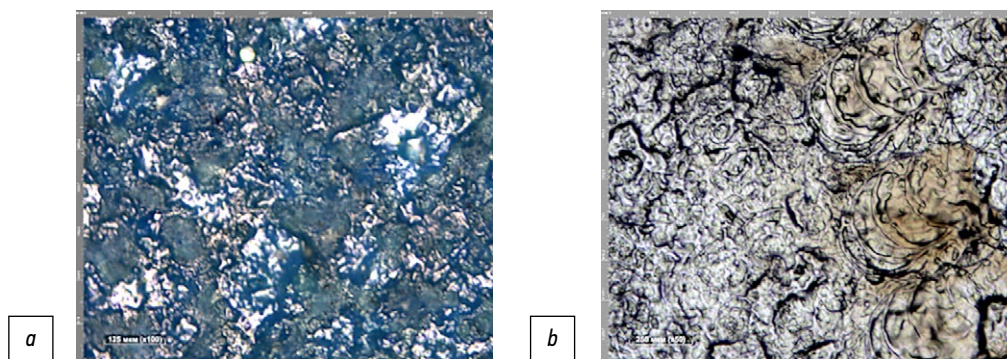
**Fig. 3.** Macroscopic morphology of sections (4 cm<sup>2</sup> each) of an alkyd paint coating (average thickness: 120 μm) before and after laser cleaning with different parameters: *a*, paint coating surface before laser cleaning; *b*, partially cleaned surface after laser cleaning in regime 2 according to Table 2; *c*, completely cleaned part of the surface after laser cleaning in regime 4 according to Table 2.

**Таблица 3.** Сравнение экспериментальных характеристик (и производных от них параметров) для некоторых режимов удаления органических слоев с металлических поверхностей, опубликованных в современных (2020–2024 гг.) зарубежных исследованиях [1, 10–12], с использованием импульсных наносекундных технологических лазеров

**Table 3.** Comparison of measured experimental characteristics (and parameters derived from them) for some parameters of organic layer removal from metal surfaces using pulsed industrial nanosecond lasers published in contemporary (2020–2024) foreign studies [1, 10–12]

№	$t_p$ , нс	$f$ , кГц	$DC$ , с/с	$E_p$ , мДж	$DC \cdot t_p$ , нс	$E'$ , МДж/дм <sup>3</sup>	$G_p$ , см <sup>2</sup> /с	$R_{svr}$ , мм	$P_p$ , (Вт/см <sup>2</sup> )·10 <sup>-6</sup>
1 — ЛО от ЛКП (уретановой грунтовки) толщиной $\delta \approx 50$ мкм на стали [12] (лазер LXX-500-2D, одномодовый режим, $\lambda = 1,064$ мкм)	100	500	0,050	1,00	5,0	7,46	13,40 (при $\alpha \approx 1$ )	0,40	88,4
2 — тоже, что и в № 1	100	100	0,010	1,00	1,0	8,064	2,48 ( $\alpha \approx 1$ )	0,40	198,9
3 — тоже для ЛО от ЛКП (из полиэфирной краски (жидкой)) толщиной $\delta \approx 25$ мкм [12]	100	500	0,050	1,00	5,0	16,08	12,44 ( $\alpha \approx 1$ )	0,40	88,4
4 — тоже, что и в № 3	100	100	0,010	1,00	1,0	20,00	2,00 ( $\alpha \approx 1$ )	0,40	198,9
5 — тоже для ЛО от ЛКП (из полиэфирной краски (порошок)) толщиной $\delta \approx 75$ мкм [12]	100	500	0,050		5,0	22,52	2,96 ( $\alpha \approx 1$ )	0,40	88,4
6 — тоже, что и в № 5	100	100	0,010		1,0	23,26	0,573 ( $\alpha \approx 1$ )	0,40	198,9
7 — ЛО эмаливого покрытия (двухслойного (полиэфир-амид-имид + полиамидимид (PAI)) с общей толщиной $\delta = 95$ мкм) на медных обмотках электродвигателей [1] (с лазерной системой NIR-типа, при $\lambda = 1,064$ мкм)	100	50	0,005	1,00	0,5	4,80	1,10 ( $\alpha \approx 1$ )	0,40	837,1
8 — тоже, что и в № 7, при $\lambda = 1,030$ мкм (лазерная система NIR-BS-типа) [1]	30	20	6,0·10 <sup>-4</sup>	50,0	0,018	10,11	10,42 ( $\alpha \approx 1$ )	0,50	638,3
9 — тоже, что и в № 7, при $\lambda = 0,532$ мкм (лазерная система VIS-типа) [1]	1,2	3·104	0,036	0,0033	0,0432	5,31	1,98 ( $\alpha \approx 1$ )	0,022	2,33
10 — тоже, что и в № 7, при $\lambda = 0,355$ мкм (лазерная система UV-типа) [1]	25	60	0,0015	0,433	0,0375	10,94	0,25 ( $\alpha \approx 1$ )	0,19	17,03
11 — тоже, что и в № 7, при $\lambda = 10,60$ мкм (лазерная система IR10-типа) [1]	2000	27	0,054	11,11	108,0	9,60	3,29 ( $\alpha \approx 1$ )	2,12	2,83
12 — ЛО (с оптоволоконным лазером (Q-switching), многомодовый режим с $N = 1$ кВт) от четырехслойного ЛКП (в т. ч. два слоя (100 + 130 мкм) эпоксидной краски) с общей $\delta = 0,34$ мм на углеродистой стали, $\lambda \approx 1,07$ мкм [10-11]	100	17	0,0017	58,8	0,17	12,98	2,27 ( $\alpha \approx 1$ )	0,89	40,8
13 — тоже, что и в № 12	100	15	0,0015	71,4	0,15	14,01	2,10 ( $\alpha \approx 1$ )	0,93	49,6
14 — тоже, что и в № 12	100	12	0,0012	83,3	0,12	14,30	2,06 ( $\alpha \approx 1$ )	0,96	57,9
15 — тоже, что и в № 12	100	12	0,0012	83,3	0,12	16,34	1,80 ( $\alpha \approx 1$ )	0,96	57,9
16 — ЛО того же покрытия, что и в № 12 (с использованием сходного ОКГ в одномодовом ( $N = 0,2$ кВт) режиме) с $\lambda \approx 1,07$ мкм [10–11]	60	200	0,0120	1,0	0,72	7,35	0,80 ( $\alpha \approx 1$ )	0,32	129,5





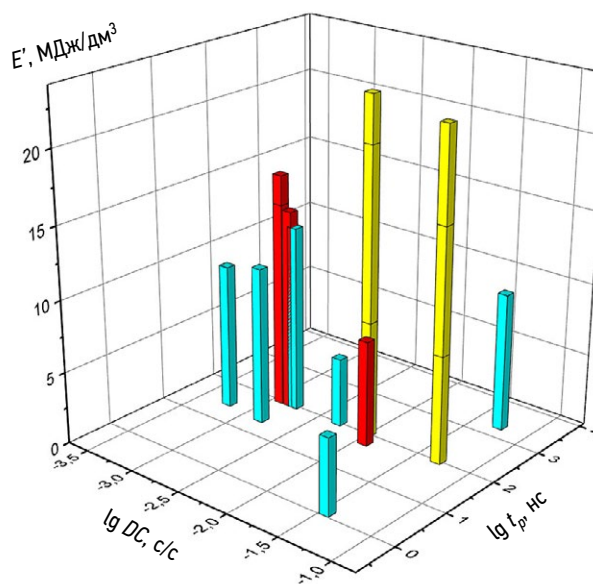
**Рис. 4.** Микроморфология участков стальных образцов, подвергавшихся лазерной очистке в наших экспериментах: *a* — вид частично очищенной от лакокрасочного покрытия поверхности в режиме № 2 по табл. 2 (при степени удаления слоя лакокрасочного покрытия  $\alpha \approx 0,30$ ), репер на фото (слева внизу) — 125 мкм; *b* — вид полностью очищенной от лакокрасочного покрытия поверхности в режиме № 4 по табл. 2 (при степени удаления слоя ЛКП  $\alpha \approx 1,0$ ), репер на фото (слева внизу) — 250 мкм.

**Fig. 4.** Microscopic morphology of sections of steel samples subjected to laser cleaning in our experiments: *a*, view of the surface partially cleaned of paint coating in regime 2 according to Table 2 (coating removal rate:  $\alpha \approx 0,30$ ), the reference bar in the photo (bottom left) is 125  $\mu\text{m}$ ; *b*, view of the surface cleaned of paint coating in regime 4 according to Table 2 (coating removal rate:  $\alpha \approx 1,0$ ), the reference bar in the photo (bottom left) is 250  $\mu\text{m}$ .

С использованием экспериментальных измерений по методике [19] нами найдено, что поверхность стальных образцов (на примере пластин из Ст3 с покрытием из краски алкидного сорта) при удалении с них покрытия в оптимальном режиме не подвергается существенной эрозии и степень шероховатости поверхности по данным оптической микроскопии является умеренной, а микротвердость (показатель по Виккерсу  $HV = 155\text{--}180$  единиц) находится на уровне, незначительно превышающем этот показатель для исходной углеродистой стали под неудаленным покрытием, для которой мы зарегистрировали микротвердость в интервале 140–170 HV. Отметим также, что сравнение морфологии поверхности стали в наших образцах после лазерного удаления указанных слоев показывает сходный ее характер (см. пример на рис. 4 *b*) с морфологией поверхности некоторых образцов после импульсной лазерной очистки в работе В.П. Вейко с соавторами, где был найден побочный эффект частичной модификации поверхности углеродистой стали [6].

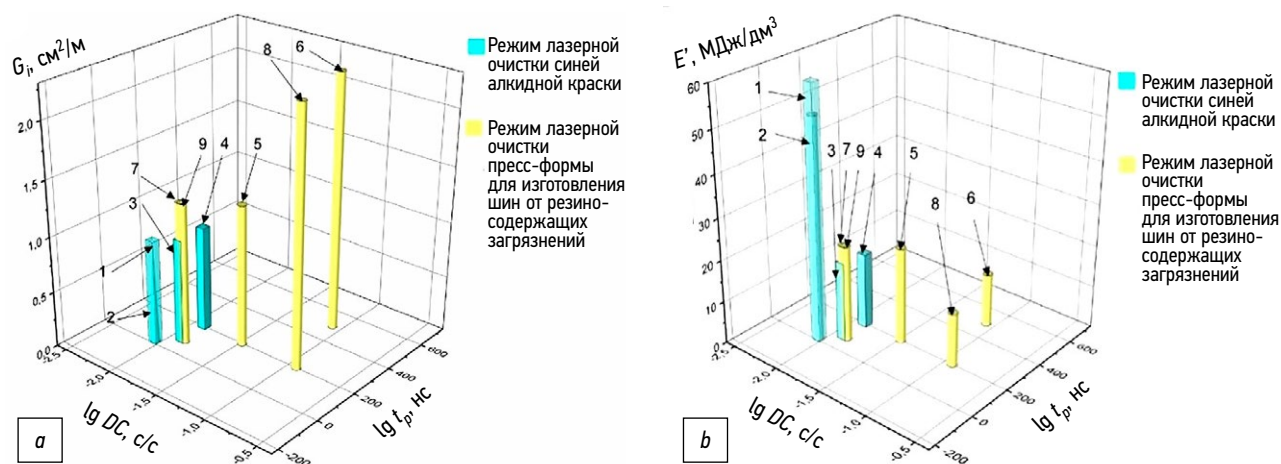
Анализ полученных нами в экспериментальной серии данных (в табл. 2) в сочетании с результатами аналогичных работ в данном направлении (с применением ОКГ с наносекундными импульсами — см. табл. 3 и рис. 5 и 6) показал наличие сложного многопараметрического характера связи между входными режимными параметрами и выходными характеристиками, а также то, что одними из наиболее явно (и прямо пропорционально) влияющих на интенсивность (т. е. обратные энергозатраты) процесса удаления органических слоев (различного состава) входных параметров являются коэффициент заполнения и длительность импульса излучения. Причем для случая небольшой группы режимов в нашей экспериментальной серии по ЛО зависимость для удельных энергозатрат (как показано на рис. 7) в однофакторном приближении может быть аппроксимирована в виде:  $\sim (\text{const} + (1/\lg(DC \cdot t_p)))$ , т.е. как обратно пропорциональная зависимость (параболического типа)

параметра  $E'$  от логарифма произведения  $DC \cdot t_p = f \cdot t_p^2$ . При этом в оптимальных режимах по нашим данным эти энергозатраты на ЛО находятся на уровне 12,7 МДж на 1  $\text{дм}^3$  вещества слоя (для случая режимов с удалением эластомерсодержащих загрязняющих веществ с поверхности из стали 40Х).



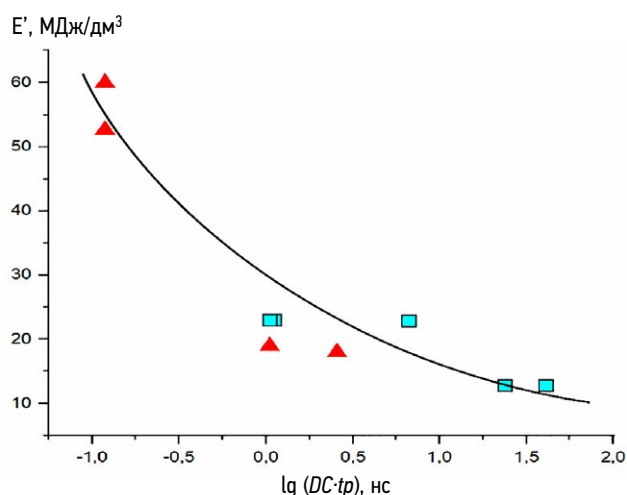
**Рис. 5.** Параметрическая зависимость для набора данных из трех экспериментальных серий по лазерной очистке различных видов слоев лакокрасочного покрытия-типа (16 точек (6+5+5)) по данным авторов публикаций [1, 10–12], — зависимость удельных энергозатрат  $E'$  (на единицу площади удаляемого слоя) от двух входных параметров (коэффициента заполнения  $DC$  и длительности импульса лазерного излучения  $t_p$ ).

**Fig. 5.** Parametric dependence for a data set from three experimental laser cleaning series of reference coating layers (16 points [6 + 5 + 5]) according to the authors of publications [1, 10–12]; dependence of specific energy consumption  $E'$  (per unit area of the removed layer) on two input parameters (duty cycle  $DC$  and laser pulse duration  $t_p$ ).



**Рис. 6.** Параметрические зависимости для наших экспериментов по лазерной очистке от алкидного лакокрасочного покрытия и от слоя резиносодержащих загрязнений: *a* — зависимость выходного параметра  $G_i$  (удельная производительность лазерной очистки) от двух входных параметров (коэффициент заполнения  $DC$  и длительность импульса лазерного излучения  $t_p$ ); *b* — зависимость выходного параметра  $E'$  (энергозатраты на  $\text{дм}^3$  объема удаляемого слоя) от двух входных параметров (от коэффициента заполнения  $DC$  и от  $t_p$ ).

**Fig. 6.** Parametric dependencies for our experiments on laser cleaning from alkyd coating and a layer of rubber-containing contaminants: *a*, dependence of the output parameter  $G_i$  (specific performance of laser cleaning) vs. two input parameters (duty cycle  $DC$  and laser pulse duration  $t_p$ ); *b*, dependence of the output parameter  $E'$  (energy consumption per  $\text{дм}^3$  of the removed layer volume) vs. two input parameters (duty cycle  $DC$  and  $t_p$ ).



**Рис. 7.** Зависимость выходного параметра — удельных энергозатрат  $E'$  в однофакторном приближении от  $DC \cdot t_p$  для нашей серии опытов в режимах (9 штук) очистки стали от алкидного лакокрасочного покрытия и слоя резиносодержащих загрязнений.

**Fig. 7.** Dependence of the output parameter (specific energy consumption  $E'$ ) in a single-factor approximation vs.  $DC \cdot t_p$  for our series of experimental cleaning (9 regimes) of steel from alkyd coating and a layer of rubber-containing contaminants.

Физические свойства слоев, удаляемых при ЛО, могут отличаться (на десятки процентов, а иногда, еще сильнее) в зависимости от их химического состава и это может быть дополнительной причиной некоторого разброса данных (помимо влияния двух рассмотренных режимных параметров лазера — длительности и частоты импульсов ЛИ), наблюдаемых, в частности на рис. 5 и 6. Так, на примере двух сортов ЛКП из полимерных красок по данным работ [8] и [9] можно видеть, что значения

свойств находятся в диапазонах (см. обозначения в уравнении (2)):  $\rho = 1700\text{--}1300 \text{ кг/м}^3$ ,  $c_p = 1,80\text{--}2,51 \text{ кДж/(кг}\cdot\text{К)}$ ,  $E = (0,416\text{--}1,0) \cdot 10^{10} \text{ Па}$ ,  $\alpha = (60,0\text{--}1,0) \cdot 10^{-6} \text{ К}^{-1}$ . Кроме того, для этих двух ЛКП такие важные свойства (влияющие на теплоперенос в материале при ЛО), как коэффициенты их теплопроводности  $k$  и температуропроводности  $a$ , находятся в интервалах  $0,2\text{--}0,3 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$  и  $(6,5\text{--}9,2) \cdot 10^{-8} \text{ м}^2/\text{с}$  соответственно.

Важно также отметить, что с учетом рассмотренных экспериментальных данных будет целесообразно в дальнейших разработках технологий изучаемого типа (т. е. ЛО-процессов) проводить выбор режимных параметров для реализации таких технологий с учетом специфики возможных механизмов удаления органических слоев, которое по данным нашего предварительного анализа экспериментальных результатов в большинстве режимов с невысокими энергозатратами [19] проходит при сочетании как наиболее изученного энергоемкого термоабляционного механизма (т.е. пиролиз с активным выходом летучих компонентов из слоя в виде смеси простых газов —  $\text{CO}$ ,  $\text{H}_2$ ,  $\text{CH}_4$ ,  $\text{H}_2\text{O}$  и иных), так и механизма отслоения фрагментов слоя/покрытия, реализующегося за счет действия индуцируемых лазерным излучением термоупругих напряжений на границе покрытие — металлическая основа и в объеме покрытия.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

При исследовании режимов импульсной лазерной очистки (ЛО) слоев краски и резиносодержащих загрязнений (на оснастке шинных производств) с конструкционных сталей определены параметры производительности ЛО и удельных энергозатрат. Эти результаты в сочетании

с данными современных работ по ЛО (с наносекундными лазерами) показали, что, несмотря на сложный многофакторный характер связи режимных параметров с указанными выходными параметрами ЛО, можно в первом приближении считать длину импульса ЛИ  $t_p$  и коэффициент заполнения  $DC$  (обратную скважность при ЛИ) одними из сильно влияющих на интенсивность очистки металлов параметров.

В оптимальных режимах энергозатраты на ЛО близки к 13 МДж на 1  $\text{дм}^3$  удаляемого слоя при очистке от резиносодержащих веществ. Для режимов в проведенных экспериментах по ЛО зависимость для удельных энергозатрат в однофакторном приближении имеет вид:  $E' \sim (\text{const} + (1/\lg(DC \cdot t_p)))$ . На примере образцов из СтЗ в ходе ЛО показано, что поверхность почти не подвергается эрозии. В целом, полученные нами результаты могут быть полезны как основа для дальнейших технологических работ по подбору, оптимизированных с точки зрения энергоэффективности, режимов ЛО органических слоев и покрытий.

## ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ИНФОРМАЦИЯ

**Вклад авторов.** О.Г. Девойно — научная идея исследования, интерпретация полученных результатов; Д.А. Шпакевич — подготовка оборудования для эксперимента, получение экспериментальных данных; А.В. Горбунов — техническая реализации идеи исследования, участие в получении экспериментальных данных, анализ и интерпретация полученных результатов; А.С. Лапковский — подготовка и наладка оборудования для эксперимента, участие в интерпретации полученных результатов; Л.И. Пилецкая — участие в получении экспериментальных данных, подготовка рукописи статьи; А.Ю. Рудницкий — подготовка и наладка оборудования для эксперимента. Все авторы статьи одобрили ее рукопись (версию для публикации).

**Источники финансирования.** Подпрограмма «Фотоника и ее применения» государственной программы научных исследований Республики

Беларусь «Фотоника и электроника для инноваций» на 2021–2025 гг., задание 1.4.

**Конфликт интересов.** Авторы декларируют отсутствие 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 использовались.

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

## ADDITIONAL INFO

**Author contributions:** Oleg G. Devoino: conceptualization, formal analysis, validation; D.A. Shpakevich: resources, investigation; A.V. Gorbunov: investigation, data curation, formal analysis, validation; A.S. Lapkovsky: resources, formal analysis; L.I. Piletskaya: investigation, writing—original draft; A.Yu. Rudnitsky: resources. All the authors approved the version of the manuscript to be published.

**Funding sources:** Photonics and Its Applications Subprogram of the State Scientific Research Program of the Republic of Belarus Photonics and Electronics for Innovations for 2021–2025, Assignment 1.4.

**Disclosure of interests:** The authors have no relationships, activities, or interests for the last three years related to for-profit or not-for-profit third parties whose interests may be affected by the content of the article.

**Statement of originality:** No previously obtained or published material (text, images, or data) was used in this study or article.

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

**Provenance and peer review:** This paper was submitted unsolicited and reviewed following the standard procedure. The peer review process involved one reviewer, a member of the editorial board, and the in-house scientific editor.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. D'Arcangelo S., Caprio L., Chesi D., et al. Methodological comparison of laser stripping solutions with contemporary pulsed lasers for e-drive copper hairpins // *Production Engineering. Research and Development*. 2024. Vol. 18, N. 3–4. P. 557–572. doi: 10.1007/s11740-023-01236-0 EDN: XHWIDC
2. Steen W.M., Mazumder J. *Laser Material Processing*. London: Springer, 2010. doi: 10.1007/978-1-4471-3752-8
3. Brygo F., Dutouquet C., Le Guern F. Laser fluence, repetition rate and pulse duration effects on paint ablation // *Applied Surface Science*. 2006. Vol. 252, N. 6. P. 2131–2138. doi: 10.1016/j.apsusc.2005.02.143 EDN: MFHYHJ
4. Brygo F., Semerok A., Weulersse J.-M. Laser ablation of a turbid medium: Modeling and experimental results // *Journal of Applied Physics*. 2006. Vol. 100, N. 3. doi: 10.1063/1.2220647 EDN: LVZFTX
5. Madhukar Y.K., Mullick S., Shukla D.K. Effect of laser operating mode in paint removal with a fiber laser // *Applied Surface Science*. 2013. Vol. 264. P. 892–901. doi: 10.1016/j.apsusc.2012.10.193
6. Вейко В.П., Кишалов А.А., Мутин Т.Ю., Смирнов В.Н. Перспективы промышленных применений лазерной очистки материалов // *Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики*. 2012. № 3 (79). С. 50–54.
7. Zhao H., Qiao Y., Du X. Laser cleaning performance and mechanism in stripping of Polyacrylate resin paint // *Applied Physics A*. 2020. Vol. 126, N. 5. doi: 10.1007/s00339-020-03551-0 EDN: NKACAQ
8. Li Y., Li J., Dong H., et al. Simulation and Experimental Study of Nanosecond Pulse Laser Removal of Epoxy Paint on 6061 Aluminum Alloy Surface // *Photonics*. 2024. Vol. 11, N. 1. doi: 10.3390/photonics11010025 EDN: LMWBEE
9. Lu Y., Yang L., Wang M., Wang Y. Simulation of nanosecond laser cleaning the paint based on the thermal stress // *Optik*. 2020. Vol. 227, N. 3. doi: 10.1016/j.ijleo.2020.165589
10. Kim J.-D., Kim J.-E., Song M.-K., Lee J.-M. A Fundamental Study on the High-Power Fiber Laser Cleaning for Removing the Multi-Layer Coating (in Korean) // *Journal of Welding and Joining*. 2020. Vol. 38, N. 6. P. 563–568. doi: 10.5781/JWJ.2020.38.6.6 EDN: YDORZO
11. Kim J.-E., Lee J.-M., Hyun J.-H. A Study on the Laser Removal of Epoxy Coatings on SS400 Surface by Beam Scanning Patterns // *Coatings*. 2021. Vol. 11, N. 12. doi: 10.3390/coatings11121510 EDN: RXGDKR

12. Deschênes J.M., Fraser A. Empirical Study of Laser Cleaning of Rust, Paint, and Mill Scale from Steel Surface. In: Lee J., Wagstaff S., Lambotte G., et al. (eds). *Materials Processing Fundamentals 2020. The Minerals, Metals & Materials Series*. Cham: Springer, 2020. P. 189–201. doi: 10.1007/978-3-030-36556-1\_17
13. Li X., Wang H., Yu W., et al. Laser paint stripping strategy in engineering application: A systematic review // *Optik*. 2021. Vol. 241, N. 509. doi: 10.1016/j.ijleo.2021.167036 EDN: XLFKHP
14. Siggs E.B. Laser and electron beam treatments for corrosion protection of friction stir welds in aerospace alloys. [Doctorate Thesis] Birmingham, 2010. Дата обращения: 20.07.2025. Режим доступа: <https://core.ac.uk/reader/77070>
15. Liu K., Garmire E. Paint removal using lasers // *Applied Optics*. 1995. Vol. 34, N. 21. P. 4409–4415. doi: 10.1364/AO.34.004409
16. Stafe M., Negutu C., Popescu I.M. Theoretical determination of the ablation rate of metals in multiple-nanosecond laser pulses irradiation

- regime // *Applied Surface Science*. 2007. Vol. 253, N. 15. P. 6353–6358. doi: 10.1016/j.apsusc.2007.01.060 EDN: MHUQSV
17. Lammers N.A., Bleeker A. Laser shockwave cleaning of EUV reticles // *Proceedings SPIE*. 2007. Vol. 6730. doi: 10.1117/12.746388
18. Campanella B., Legnaioli S., Pagnotta S. Shock Waves in Laser-Induced Plasmas // *Atoms*. 2019. Vol. 7, N. 2. doi: 10.3390/atoms7020057 EDN: FNQBLT
19. Девойно О.Г., Горбунов А.В., Шпакевич Д.А., и др. Оценка параметров лазерной очистки от продуктов коррозии на стали и низколегированных сплавах при сопоставлении со скоростью лазерно-пиролизного удаления органических пленок с металлов. В кн.: *Современные методы и технологии создания и обработки материалов: сборник научных трудов физико-технического института нан беларуси*. В 2 кн. Кн. 2. Технологии и оборудование механической и физико-технической обработки. Минск: ФТИ НАНБ, 2024. С. 31–47. EDN: WIDHCA

## REFERENCES

1. D'Arcangelo S, Caprio L, Chesi D, et al. Methodological comparison of laser stripping solutions with contemporary pulsed lasers for e-drive copper hairpins. *Production Engineering. Research and Development*. 2024;18(3-4):557–572. doi: 10.1007/s11740-023-01236-0 EDN: XHWIDC
2. Steen WM, Mazumder J. *Laser Material Processing*. London: Springer; 2010. doi: 10.1007/978-1-4471-3752-8
3. Brygo F, Dutouquet C, Le Guern F. Laser fluence, repetition rate and pulse duration effects on paint ablation. *Applied Surface Science*. 2006;252(6):2131–2138. doi: 10.1016/j.apsusc.2005.02.143 EDN: MFHYHJ
4. Brygo F, Semerok A, Weulersse J-M. Laser ablation of a turbid medium: Modeling and experimental results // *Journal of Applied Physics*. 2006;100(3). doi: 10.1063/1.2220647 EDN: LVZFTX
5. Madhukar YK, Mullick S, Shukla DK. Effect of laser operating mode in paint removal with a fiber laser. *Applied Surface Science*. 2013;264:892–901. doi: 10.1016/j.apsusc.2012.10.193
6. Veiko VP, Kishalov AA, Mutin TYu, Smirnov VN. Prospects for industrial applications of laser cleaning of materials. *Nauchno-tekhnicheskij vestnik informatsionnykh tekhnologij, mekhaniki i optiki*. 2012;3(79):50–54. (In Russ.)
7. Zhao H, Qiao Y, Du X. Laser cleaning performance and mechanism in stripping of Polyacrylate resin paint. *Applied Physics A*. 2020;126(5). doi: 10.1007/s00339-020-03551-0 EDN: NKACAQ
8. Li Y, Li J, Dong H, et al. Simulation and Experimental Study of Nanosecond Pulse Laser Removal of Epoxy Paint on 6061 Aluminum Alloy Surface. *Photonics*. 2024;11(1). doi: 10.3390/photonics11010025 EDN: LMWBEE
9. Lu Y, Yang L, Wang M, Wang Y. Simulation of nanosecond laser cleaning the paint based on the thermal stress. *Optik*. 2020;227(3). doi: 10.1016/j.ijleo.2020.165589
10. Kim J-D, Kim J-E, Song M-K, Lee J-M. A Fundamental Study on the High-Power Fiber Laser Cleaning for Removing the Multi-Layer Coating (in Korean). *Journal of Welding and Joining*. 2020;38(6):563–568. doi: 10.5781/JWJ.2020.38.6.6 EDN: YDORZO
11. Kim J-E, Lee J-M, Hyun J-H. A Study on the Laser Removal of Epoxy Coatings on SS400 Surface by Beam Scanning Patterns. *Coatings*. 2021;11(12). doi: 10.3390/coatings11121510 EDN: RXGDKR
12. Deschênes JM, Fraser A. Empirical Study of Laser Cleaning of Rust, Paint, and Mill Scale from Steel Surface. In: Lee J., Wagstaff S., Lambotte G., et al. (eds). *Materials Processing Fundamentals 2020. The Minerals, Metals & Materials Series*. Cham: Springer; 2020:189–201. doi: 10.1007/978-3-030-36556-1\_17
13. Li X, Wang H, Yu W, et al. Laser paint stripping strategy in engineering application: A systematic review. *Optik*. 2021;241(509). doi: 10.1016/j.ijleo.2021.167036 EDN: XLFKHP
14. Siggs EB. Laser and electron beam treatments for corrosion protection of friction stir welds in aerospace alloys [Doctorate Thesis] Birmingham; 2010. Accessed: 20.07.2025. Available from: <https://core.ac.uk/reader/77070>
15. Liu K, Garmire E. Paint removal using lasers. *Applied Optics*. 1995;34(21):4409–4415. doi: 10.1364/AO.34.004409
16. Stafe M, Negutu C, Popescu IM. Theoretical determination of the ablation rate of metals in multiple-nanosecond laser pulses irradiation regime. *Applied Surface Science*. 2007;253(15):6353–6358. doi: 10.1016/j.apsusc.2007.01.060 EDN: MHUQSV
17. Lammers NA, Bleeker A. Laser shockwave cleaning of EUV reticles. *Proceedings SPIE*. 2007;6730. doi: 10.1117/12.746388
18. Campanella B, Legnaioli S, Pagnotta S. Shock Waves in Laser-Induced Plasmas. *Atoms*. 2019;7(2). doi: 10.3390/atoms7020057 EDN: FNQBLT
19. Devoino OG, Gorbunov AV, Shpakevich DA, et al. Evaluation of the parameters of laser cleaning from corrosion products on steel and low-alloy alloys in comparison with the rate of laser-pyrolysis removal of organic films from metals. In: *Modern methods and technologies for the creation and processing of materials. Collection of works of the Physical-Technical Institute of the National Academy of Sciences of Belarus*. In 2 books. Book 2. Minsk: Physicotechnical Institute of the National Academy of Sciences of Belarus; 2024;2:31–47. (In Russ.) EDN: WIDHCA

## ОБ АВТОРАХ

### Девойно Олег Георгиевич,

д-р техн. наук, профессор, заведующий отраслевой научно-исследовательской лабораторией плазменных и лазерных технологий, филиал БНТУ «Научно-исследовательский политехнический институт»;  
ORCID: 0000-0001-7088-0435;  
eLibrary SPIN: 3663-9748;  
e-mail: devoino-o@mail.ru

## AUTHORS' INFO

### Oleg G. Devoino,

Dr. Sci. (Engineering), Professor, Head of Plasma and Laser Technology Laboratory, Belarusian National Technical University;  
ORCID: 0000-0001-7088-0435;  
eLibrary SPIN: 3663-9748;  
e-mail: devoino-o@mail.ru

**\* Шпакевич Дмитрий Алексеевич,**

инженер, научно-исследовательская лаборатория плазменных и лазерных технологий, филиал БНТУ «Научно-исследовательский политехнический институт»; адрес: Республика Беларусь, 220013, Минск, пр. Независимости, д. 65; e-mail: dimaschpakevitch@gmail.com

**Горбунов Андрей Васильевич,**

канд. техн. наук, старший научный сотрудник, научно-исследовательская лаборатория плазменных и лазерных технологий, филиал БНТУ «Научно-исследовательский политехнический институт»; ORCID: 0009-0001-4800-3724; eLibrary SPIN: 6517-2035; e-mail: gorbunov\_hmti@mail.ru

**Лапковский Александр Сергеевич,**

научный сотрудник, научно-исследовательская лаборатория плазменных и лазерных технологий, филиал БНТУ «Научно-исследовательский политехнический институт»; eLibrary SPIN: 2439-3009; e-mail: alapkovskii@gmail.com

**Пилецкая Людмила Игнатьевна,**

научный сотрудник, научно-исследовательская лаборатория плазменных и лазерных технологий, филиал БНТУ «Научно-исследовательский политехнический институт»; eLibrary SPIN: 5133-8078; e-mail: pileckayli@bntu.by

**Рудницкий Андрей Юрьевич,**

младший научный сотрудник, научно-исследовательская лаборатория плазменных и лазерных технологий, филиал БНТУ «Научно-исследовательский политехнический институт»; eLibrary SPIN: 8913-3014; e-mail: rud5001@mail.ru

**\* Dmitry A. Shpakevich,**

engineer, Plasma and Laser Technology Laboratory, Belarusian National Technical University; address: 65, Nezavisimosti Ave, 220013, Minsk, Republic of Belarus; e-mail: dimaschpakevitch@gmail.com

**Andrei V. Gorbunov,**

Cand. Sci. (Engineering), senior researcher, Plasma and Laser Technology Laboratory, Belarusian National Technical University; ORCID: 0009-0001-4800-3724; eLibrary SPIN: 6517-2035; e-mail: gorbunov\_hmti@mail.ru

**Alexander S. Lapkovsky,**

researcher, Plasma and Laser Technology Laboratory, Belarusian National Technical University; eLibrary SPIN: 2439-3009; e-mail: alapkovskii@gmail.com

**Lyudmila I. Piletskaya,**

researcher, Plasma and Laser Technology Laboratory, Belarusian National Technical University; eLibrary SPIN: 5133-8078; e-mail: pileckayli@bntu.by

**Andrei Yu. Roudnitsky,**

junior researcher, Plasma and Laser Technology Laboratory, Belarusian National Technical University; eLibrary SPIN: 8913-3014; e-mail: rud5001@mail.ru

\* Автор, ответственный за переписку / Corresponding author

Оригинальное исследование

УДК 621.43 6.3

DOI: [https://doi.org/10.52899/24141437\\_2025\\_03\\_303](https://doi.org/10.52899/24141437_2025_03_303)

EDN: QHFENA

# Исследование влияния формы впускного клапана с различным числом спиральных направляющих (лопастей), при изменении температуры в цилиндре судового малоразмерного двигателя Ч8,5/11

А.З. Курбанов, Н.М. Вагабов, Н.К. Санаев, В.В. Егоров

Дагестанский государственный технический университет, Махачкала, Россия

## АННОТАЦИЯ

**Актуальность.** Обзор литературы показывает, что изучение распределения температуры и влияния давления является важной основой для проектирования наиболее износостойких и долговечных клапанов, и существенно влияет на выбор материалов для их изготовления. Изучение распределения температуры внутри клапанов при давлении, оказываемом на них во время работы двигателя, экспериментально является очень трудоемкой и затратной задачей. Такие расчеты необходимо выполнять с помощью программного обеспечения, которое позволяет учесть определенные прикладываемые нагрузки в зависимости от угла поворота коленчатого вала двигателя на исследуемом образце.

**Цель работы.** Объектом исследования являлся клапан судового малоразмерного двигателя заводского изготовления и такие же клапаны с измененной конструкцией, добавлением спиральных направляющих (ширм, лопастей), для изучения влияния температуры, оказываемых на них в зависимости от поворота коленчатого вала. При этом материал конструкции оставался однородным во всех исследуемых клапанах.

**Методика.** Для выполнения поставленных задач был использован метод конечных элементов, реализованный в программе Ansys, с помощью которой был проведен нестационарный термомеханический расчет клапанов различных конструкций с однородным материалом на примере клапана судового малоразмерного двигателя Ч8,5-11, с последующим анализом полученных результатов, их изучение и сравнение.

Для удобства решения исследование было разбито на две части. В данной части проводится изучение влияния температуры в процессе работы судового малоразмерного двигателя Ч8,5/11, в будущей, изученные температурные поля будут передаваться в испытываемое клапанами давление в цилиндре судового малоразмерного двигателя.

**Результаты.** На данном этапе при использовании метода конечных элементов, были построены и визуализированы температурные поля клапанов различных конструкций, рассчитана плотность теплового потока, а также проанализировано значение имеющихся на клапанах спиральных направляющих в зависимости от температуры. Поскольку расчет был нестационарным, для исследования судового малоразмерного двигателя были выбраны максимальные испытываемые температурные напряжения, действующие на клапаны в процессе эксплуатации.

**Выводы.** В результате проведенного моделирования были получены данные по распределению температуры внутри тарелок исследуемых клапанов, из стали 40Х, которую имеется возможность просмотреть в любой момент исследуемого интервала. При изучении теплового потока в клапанах разных конструкций было выявлено, что тепловой поток увеличился в клапане с 3 лопастями = 283,12 Вт/мм<sup>2</sup>, а в конструкции с 6 лопастями = 281,49 Вт/мм<sup>2</sup>.

**Ключевые слова:** Ansys; температура; напряжения; метод конечных элементов; качество; производительность; моделирование; проектирование; судовый; двигатель; клапан; лопасть; судовый малоразмерный двигатель.

## Как цитировать

Курбанов А.З., Вагабов Н.М., Санаев Н.К., Егоров В.В. Исследование влияния формы впускного клапана с различным числом спиральных направляющих (лопастей), при изменении температуры в цилиндре судового малоразмерного двигателя Ч8,5/11 // Труды Санкт-Петербургского государственного морского технического университета. 2025. Т. 4, № 3. С. 303–316. DOI: [10.52899/24141437\\_2025\\_03\\_303](https://doi.org/10.52899/24141437_2025_03_303) EDN: QHFENA

Original Study Article

DOI: [https://doi.org/10.52899/24141437\\_2025\\_03\\_303](https://doi.org/10.52899/24141437_2025_03_303)

EDN: QHFENA

# Effect of Shape of Intake Valve With Different Number of Spiral Guides (Blades) When Changing Temperature in the Cylinder of Small-Sized Marine Engine Ch8.5/11

Ali Z. Kurbanov, Nurulla M. Vagabov, Nadir K. Sanaev, Valentin V. Egorov

Dagestan State Technical University, Makhachkala, Russia

## ABSTRACT

**BACKGROUND:** A review of the literature shows that the study of temperature distribution and the effect of pressure is an important basis for the design of the most wear-resistant and durable valves and significantly affects the choice of materials. Studying the temperature distribution inside valves at the pressure exerted on them during engine operation is experimentally a very time-consuming and demanding task. It is required to perform such calculations with software allowing to consider certain loads based the crankshaft rotation angle of the test sample.

**AIM:** The object of the study was a valve of a factory-built small-sized marine engine and the same valves with a modified design and added spiral guides (screens, blades) to study the effect of temperature exerted on them depending on the crankshaft rotation. All studied valves had the homogeneous structural material.

**METHODS:** To conduct the study, we used the finite element method implemented in the Ansys software, where a non-stationary thermomechanical calculation of valves with different designs made of homogeneous material was performed using the small-sized marine engine Ch8.5-11 valve with the subsequent analysis of the results, their study, and comparison.

For the convenience of the solution, the study was divided into two parts. In this part, the influence of temperature during the operation of the small-sized marine engine Ch8.5/11 is studied; the future study will involve the transfer of the studied temperature fields to the pressure in the small-sized marine engine cylinder tested by the valves.

**RESULTS:** At this stage, the finite element method was used to build and visualize the temperature fields of valves with different designs, to calculate the heat flux density, and to analyze the value of the spiral guides installed on the valves in relation to the temperature. As the calculation was non-stationary, we selected the highest test temperature stresses exerted on the valves during operation for the small-sized marine engine study.

**CONCLUSION:** The simulation allowed to collect data on the temperature distribution inside valve trays of the studied 40X steel valves, which can be viewed at any time of the studied interval. The study of the heat flux in valves of different designs revealed that the heat flux increased in the valve with 3 blades (283.12 W/mm<sup>2</sup>) and the heat flux in the design with 6 blades was 281.49 W/mm<sup>2</sup>.

**Keywords:** Ansys; temperature; stresses; finite element method; quality; performance; simulation; design; marine; engine; valve; blade; small-sized marine engine.

## To cite this article

Kurbanov AZ, Vagabov NM, Sanaev NK, Egorov VV. Effect of Shape of Intake Valve With Different Number of Spiral Guides (Blades) When Changing Temperature in the Cylinder of Small-Sized Marine Engine Ch8.5/11. *Transactions of the Saint Petersburg State Marine Technical University*. 2025;4(3):303–316. DOI: [10.52899/24141437\\_2025\\_03\\_303](https://doi.org/10.52899/24141437_2025_03_303) EDN: QHFENA

Submitted: 26.06.2025

Accepted: 30.06.2025

Published online: 22.09.2025

## ВВЕДЕНИЕ

В современных конструкциях судовых малоразмерных дизелей (СМД), актуальной задачей является поиск способов получения наиболее качественной смеси и совершенствования деталей, с целью повышения их экономичности, долговечности, экологичности. Все эти и многие другие факторы напрямую зависят от того какой материал и детали используют конструкторы при создании двигателя. Изменение таких параметров как форма камер сгорания (КС), размеры КС, её расположение, направление движение впрыскиваемого топлива и воздушного потока, изменение конструкции головок цилиндра (ГЦ) с целью завихрения воздушного заряда, изменение размера тарелки всасывающего клапана для более полного насыщения цилиндров и большей устойчивости к температуре и давлению испытываемом при эксплуатации или увеличение их количества, влекут за собой не только изменение отдельных конструктивных элементов, но и изменение конструкции самого двигателя, как правило, это изменение формы и размеров головки цилиндров (ГЦ), блок картера, а впоследствии и других узлов, что в большинстве случаев является нецелесообразным и ведёт к их удорожанию. Ещё одним недостатком является то, что все конструкции ГЦ закручивают воздушный поток до входа воздуха через клапан, а при поступлении его в цилиндр поток в некоторой степени выравнивается, проходя через узкое пространство между фаской и седлом. Для этого необходимо искать пути решения изменения конструкции отдельных деталей, уже приспособленных для данного типа двигателей, не требующих переоборудования всего двигателя и высоких затрат на их изготовление. Одним из таких СМД является модельный ряд 4С8,5/11, 4С4/9,5/11, 6С4. Пространство для размещения как всасывающих, так и выхлопных клапанов ограничено диаметральными размерами втулок цилиндров, что в данном случае не позволяет увеличить диаметр тарелки клапана, увеличить их количество, а также изменить их расположение. Наиболее выгодным вариантом в данном случае будет изменение конструкции впускного клапана с целью создания не только необходимого благоприятного воздушного потока на входе в цилиндр для получения качественной смеси, но и для повышения выносливости, температуростойкости клапанов при работе СМД. Для того чтобы изменить конструкцию клапанов необходимо задаться целью о целесообразности использования видоизменённого клапана и влиянии на него изменения температуры и давления в цилиндре СМД, чтобы выбрать наиболее выгодную модель.

В этой связи требуется проведение исследований, связанных с изучением нагрузок, испытываемых клапанами при вращении коленчатого вала. Учитывая востребованность СМД Российского производства в речном и морском флоте, базовой моделью для исследования был выбран СМД 4С8,5/11.

## ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

В силу того, что существующая технология не обеспечивает точную картину распределения температурного поля внутри тарелок клапанов различных конструкций, воздействующего на деталь, существует необходимость провести численные расчёты с использованием метода конечных элементов в программном комплексе Ansys. Для этого необходимо решить следующие задачи:

1. Разработать 3D модели клапанов разных конструкций для их дальнейшего анализа с применением метода конечных элементов.
2. Провести тепловой расчёт исследуемого СМД, с использованием метода Гриневецкого–Мазинга, с выводом диаграмм распределения температуры и давления.
3. Создать качественную сеточную модель конечных элементов на исследуемых клапанах.
4. Установить необходимые граничные условия, исходя из диаграмм полученных при тепловом расчёте СМД 4С8,5/11, для проведения нестационарного термомеханического расчёта.
5. Определить распределение температурного поля внутри клапанов и его влияния на клапаны разных конструкций.
6. Рассчитать плотность теплового потока.

Для удобства решения задач исследование было разбито на две части. В данной работе изучено влияние температуры в процессе работы СМД 4С8,5/11. В будущем, изученные температурные поля будут учитываться расчете давления, испытываемого клапанами в цилиндре СМД.

## МЕТОДЫ

При проведении исследований применялся метод конечных элементов, рассчитанный в программе «Ansys».

## ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

### Литературный обзор состояния клапанов в процессе работы судовых двигателей

Клапаны в газораспределительном механизме судовых двигателей (СД) работают в условиях повышенной температуры и давления, в среднем температура клапанов может достигать 550/650°C, а в высокофорсированных двигателях 750/800°C. При таких температурах конструкция клапана подвержена высокотемпературной коррозии, [1] короблению тарелки клапана в разных направлениях и как следствие, нарушению посадочного конуса, что приводит к увеличению зазора между седлом и посадочным пояском. Для впускного клапана указанное обстоятельство означает снижение степени сжатия в цилиндре двигателя, утрату работоспособности детали и газораспределительного механизма. Известны



работы [2] по изучению влияния температуры и давления на впускной и выпускной клапан, в основном все исследования проводятся в программных комплексах (ПК) учитывая, что экспериментально создать карту распределения температурного поля в клапане очень трудоёмкая задача так же, как и воздействие давления и расчёт предельно допустимых нагрузок. Как правило, указанные задачи трудоёмки и требуют не только дополнительных средств, но и наличие лабораторного оборудования. К примеру, в статье [3] авторы для изучения влияния высоких температур на микроструктуру клапана используют сканирующий электронный микроскоп. При помощи которого анализировали структуру изношенных и новых деталей. В работе [4] авторы изучают термические повреждения впускных клапанов в программе «Lotus Engine Simulation», для выполнения расчёта задавались действительные параметры исследуемого ДВС и размеры клапанов. В статье [5] изучается воздействие на впускной и выпускной клапаны коэффициента теплопередачи и температуры, в зависимости от оборотов коленчатого вала с применением ПО 1D Ricardo Wave, где моделировался двигатель для получения происходящих в нём мгновенных термодинамических параметров, которые трудно измерить экспериментально.

Обзор литературы показывает, что изучение распределения температуры и воздействия давления является важной основой для целей проектирования наиболее износостойких и долговечных клапанов и выбора материалов при их изготовлении. В научных трудах реже встречаются статьи с изучением различных видоизменённых форм конструкций клапанов. К примеру, работа [2], где экспериментально изучен клапан с винтовыми направляющими (лопастями), которые выполнены на внешней

стороне тарелки клапана и способствуют, не только закручиванию поступающего в цилиндр воздушного заряда, но и более плавному распределению температуры на тарелке клапана, что и описано в проведённом эксперименте на примере судового малоразмерного двигателя (СМД) 4Ч-9,5/11.

В статьях [6, 7] также описан эксперимент в ПК «Ansys», при помощи CFD моделирования, о влиянии различных размеров шпирм, спиральных направляющих (лопастей), расположенных на внешней стороне тарелки клапана и их анализ на вихревое число в цилиндре двигателя, коэффициент завихрений, кинетической энергии турбулентности.

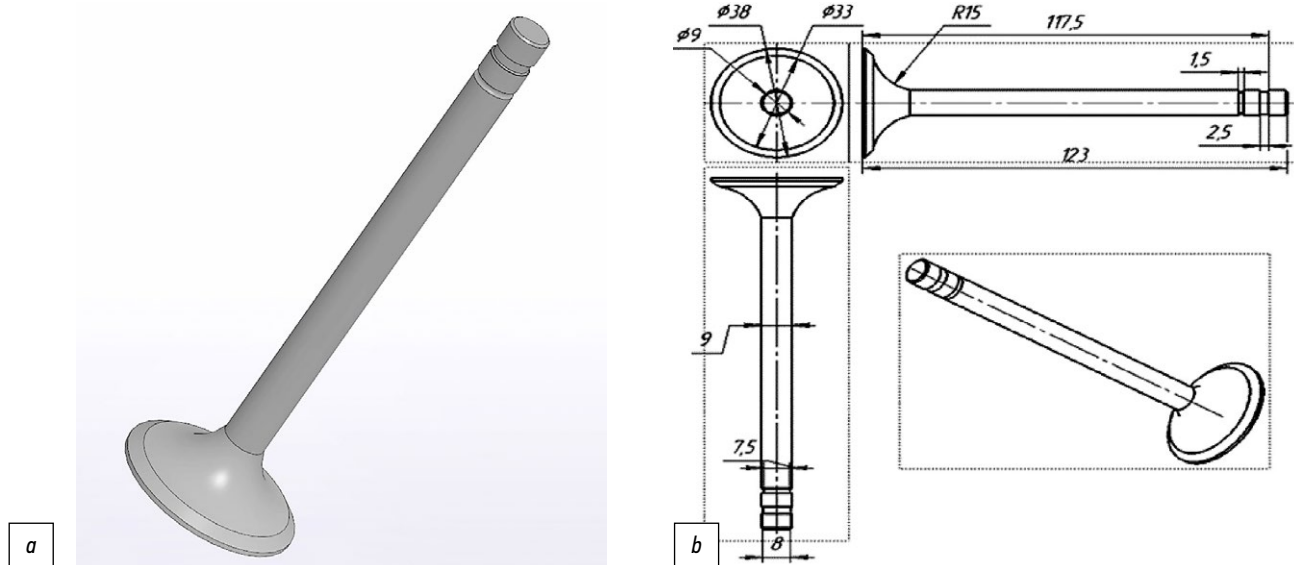
Таким образом, целью данной работы является исследование влияния формы впускного клапана с различным количеством спиральных направляющих (лопастей) на испытываемую им температуру в цилиндре СМД, в зависимости от угла поворота коленчатого вала (ПКВ), без изменения материала, из которого изготовлен клапан.

### Методы исследования и материал впускных клапанов

Объектом исследования являлся впускной клапан СМД Ч8,5/11 (рис. 1).

Для изготовления впускных клапанов, которые испытывают сравнительно, невысокие температуры по сравнению с выпускными используют в основном легированные стали [8] такие, как 40Х, 40ХН, 40ХНМА, 37ХС и др.

При проведении исследования клапанов разных конструкций испытывались клапаны из стали марки 40Х, наиболее распространённую и подходящую для поставленной цели. В (табл. 1 и 2) приведены основные физические и химические параметры данной стали.



**Рис. 1.** Общий вид исследуемого клапана судового малоразмерного двигателя Ч8,5/11: *a* — представленный в 3D модели; *b* — основные размеры клапана [8].

**Fig. 1.** General view of the studied valve of the small-sized marine engine Ch8.5/11: *a*, 3D model; *b*, main dimensions of the valve [8].

СМД типов Ч8,5/11, Ч9,5/11, Ч10,5/13, с рядным расположением и количеством цилиндров 2, 4, и 6, соответственно, номинальной частотой вращения коленчатого вала от 1000 до 1800 оборотов. Диапазон мощностей от 8 до 65 кВт, без наддува. Имели широкое применение в качестве вспомогательных и являющихся базовыми двигателями для главных энергетических установок рабочих и спасательных шлюпок, рыбопромысловых ботов и служебных катеров [9]. За время своей эксплуатации эти модели зарекомендовали себя с положительной стороны и по работоспособности, и по производительности, некоторые СМД данного класса, используются и работают сейчас. Технические данные исследуемого СМД представлены в табл. 3 [8].

Существует достаточно много методов решения задач теплопроводности и статики, наиболее распространёнными являются аналитические и численные, учитывая, что современный уровень вычислительной техники позволяет использовать численные методы практически для любых задач как теплопроводности, так и статических расчётов, в том числе и нестационарных [10], то в качестве метода исследования влияния формы впускного клапана СМД на испытываемую им температуру, в зависимости от угла ПКВ, был использован метод конечных элементов (МКЭ) в ПК Ansys.

Для решения задачи нахождения температурного поля в твёрдом теле (металл 40X), в качестве закона теплопроводности использовался закон Фурье [11]:

$$\vec{g} = -\lambda grad(T) = -\lambda \vec{n} \frac{\partial T}{\partial n}, \quad (1)$$

где  $\vec{g}$  — вектор плотности теплового потока,  $\lambda$  — коэффициент теплопроводности,  $\vec{n}$  — вектор нормали к изотермической поверхности,  $\partial T/\partial n$  — производная по направлению. Знак «-» в формуле обусловлен тем, что  $grad(T)$  направлен в сторону возрастания температуры, а тепловой поток распространяется из области с большей в область с меньшей температурой.

В программе использовался нестационарный термомеханический анализ (Thermo-Mechanical Analysis, ТМА) клапанов различных конструкций. В качестве временного интервала и нагрузок на данном этапе, был выбран угол ПКВ при повышении температуры исследуемого СМД Ч4-8,5/11 из полученной диаграммы (рис. 2).

Исследование проводилось поэтапно, для наиболее точного определения граничных условий задания температуры при номинальных оборотах двигателя  $n=1500$  (1/мин), необходимо было произвести тепловой расчёт исследуемого двигателя с использованием метода

**Таблица 1.** Физические свойства стали 40X, в зависимости от изменения температуры

**Table 1.** Physical properties of steel 40X in relation to temperature changes

Температура, °С	Плотность $\rho$ , кг/м <sup>3</sup>	Модуль упругости, $E \cdot 10^{-5}$ , МПа	Коэффициент линейного расширения, $\alpha \cdot 10^6$ , 1/К	Коэффициент теплопроводности $\lambda$ , Вт/(м·К)	Удельная теплоёмкость $C$ , Дж/(кг·К)	Удельное электросопротивление $R \cdot 10^9$ , Ом·м
20	7820	2,14	–	–	–	210
100	7800	2,11	11,9	46	466	285
200	7770	2,06	12,5	42,7	508	346
300	7740	2,03	13,2	42,3	529	425
400	7700	1,85	13,8	38,5	563	528
500	7670	1,76	14,1	35,6	592	642
600	7630	1,64	14,4	31,9	622	780
700	7590	1,43	14,6	28,8	634	936
800	7610	1,32	–	26	664	1100
900	7560	–	–	26,7	–	1140
1000	7510	–	–	28	–	1170
1100	7470	–	–	28,8	–	1200
1200	7430	–	–	–	–	1230

**Таблица 2.** Химический состав стали 40X

**Table 2.** Chemical composition of steel 40X

Углерод	Кремний	Марганец	Сера	Фосфор	Никель	Хром	Медь	Железо
C	Si	Mn	S	P	Ni	Cr	Cu	Fe
0,36–0,44	0,17–0,37	0,50–0,80	до 0,035	до 0,035	до 0,3	0,8–0,11	до 0,3	~97

**Таблица 3.** Исходные данные исследуемого судового малоразмерного двигателя Ч8,5/11**Table 3.** Initial specifications of the studied small-sized marine engine Ch8.5/11

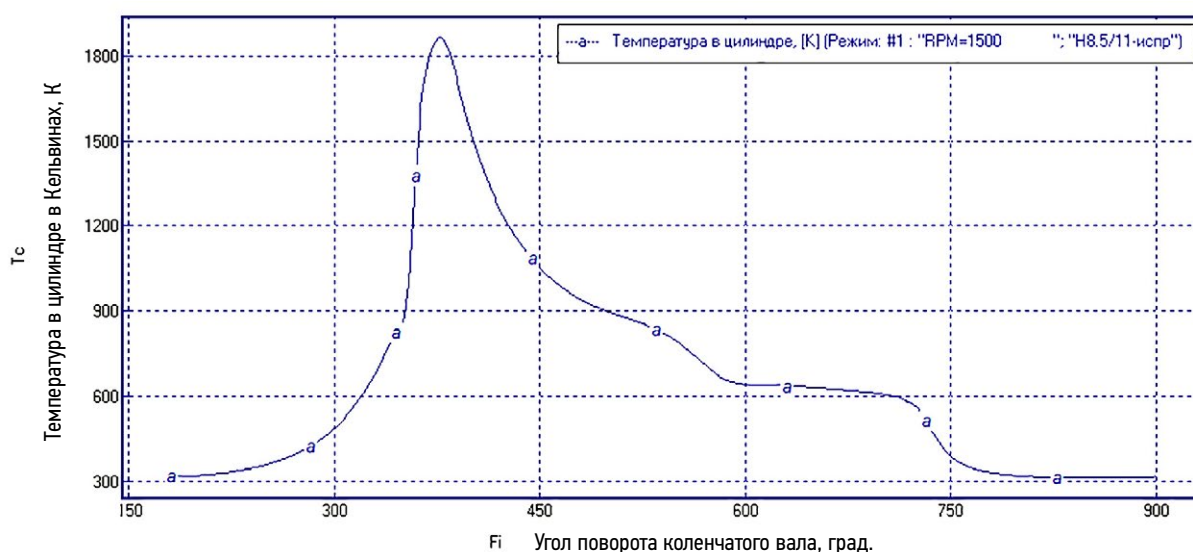
Тип двигателя	Дизельный, поршневой, тронковый, бескомпрессорный
Число тактов	4
Порядок работы цилиндров	1-5-3-6-2-4
Расположение цилиндров	Рядное
Число цилиндров	4
Диаметр цилиндра, мм	85
Ход поршня, мм	110
Средняя скорость поршня, м/с	5,5
Степень сжатия	17
Давление сжатия, кг/см <sup>2</sup>	33–41
Максимальное давление сгорания, кг/см <sup>2</sup>	65–75
Система охлаждения	Жидкостная
Коэффициент избытка воздуха	1,43 для дизелей без наддува
Номинальная мощность л.с./ кВт	26 л.с./19кВт
Частота вращения вала при номинальной мощности	1500
Минимальная частота вращения коленчатого вала на режиме холостого хода	800

Гриневецкого–Мазинга, который был рассчитан в программе Дизель-ПК. Где так же была получена индикаторная диаграмма работы СМД 4Ч-8,5/11 (см. рис. 2), с целью дальнейшего использования полученных параметров температуры и приложения таких же нагрузок (условий) на испытываемый клапан в зависимости от частоты коленчатого вала.

Для того чтобы интегрировать данные, полученные из рис. 2, в ПК Ansys предварительно необходимо перевести температуру в «Кельвинах», в температуру  $T$  в «Цельсия»,

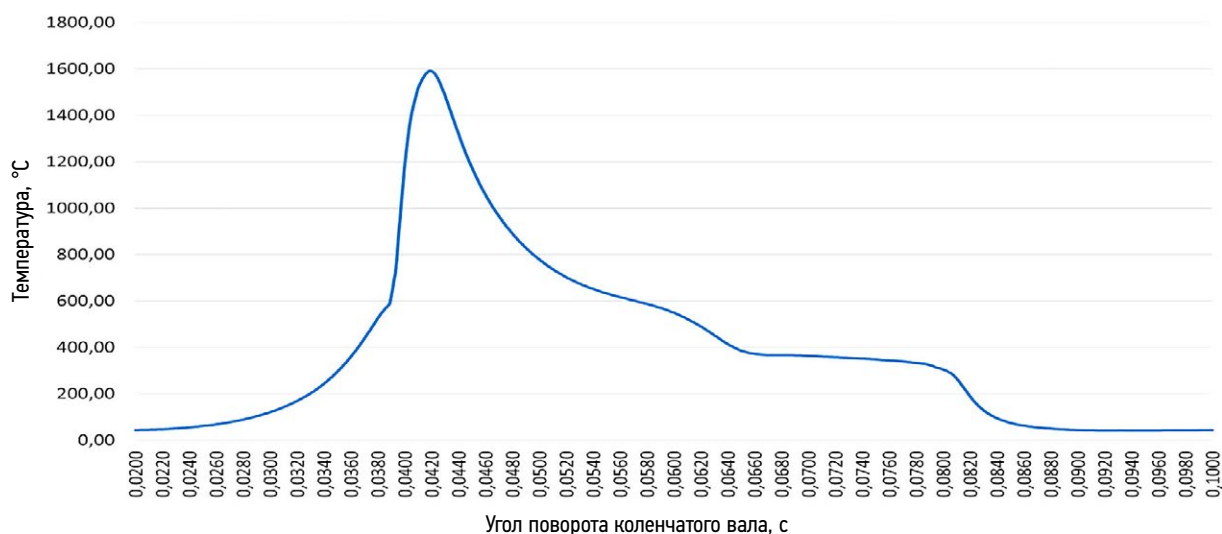
и углы ПКВ в секунды, т.к. Ansys рассчитывает временной промежуток в секундах, температуру в «Цельсия» (рис. 3).

Следующим условием было построение 3D моделей клапанов с изменёнными конструкциями, моделирование проводилось в программе Компас 3D, использовалась модель заводского клапана (рис. 1) и клапаны таких же размеров и материалов с добавлением винтовых направляющих (лопастей) с количеством 3, 6. (рис. 4 и 5), с последующим интегрированием в среду Ansys для проведения нестационарного термомеханического анализа.



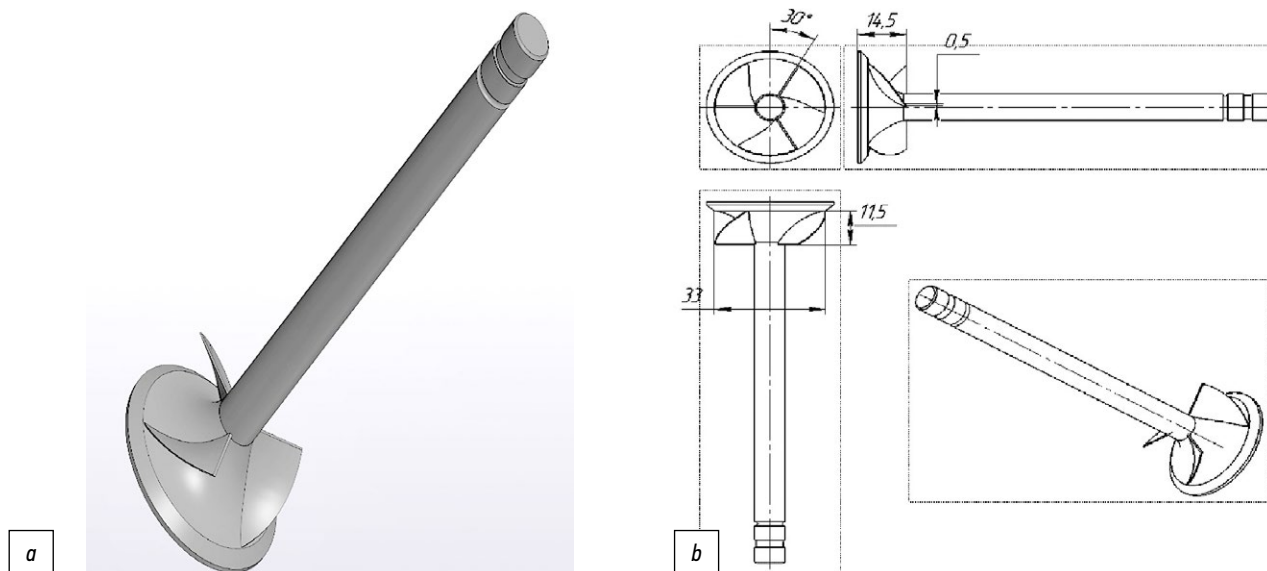
**Рис. 2.** Температура в цилиндре судового малоразмерного двигателя 4Ч-8,5/11 в кельвинах (К) в зависимости от поворота коленчатого вала в градусах, полученная в программе Дизель ПК.

**Fig. 2.** Temperature in the cylinder of the small-sized marine engine 4Ch-8.5/11 in Kelvin (K) in relation to the crankshaft rotation (degrees) determined with the Diesel RK software.



**Рис. 3.** График распределения температуры в цилиндре исследуемого судового малоразмерного двигателя 4С4-8,5/11 (в градусах цельсия), в зависимости от поворота коленчатого вала в секундах, для задания граничных условий в ПК Ansys.

**Fig. 3.** Temperature distribution graph for the cylinder of the studied small-sized marine engine 4Ch-8.5/11 (degrees Celsius) in relation to the crankshaft rotation (seconds) used to set boundary conditions in the Ansys software.



**Рис. 4.** Внешний вид клапана с тремя направляющими (лопастями): *a* — выполненный в 3D модели; *b* — основные параметры направляющих (лопастей).

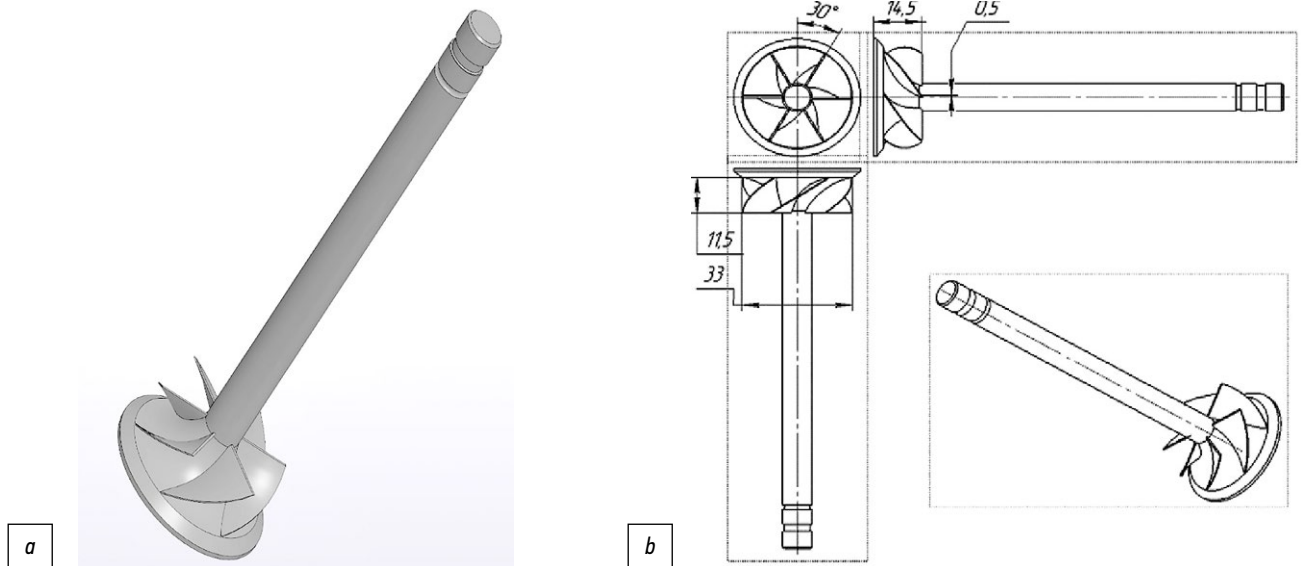
**Fig. 4.** View of a valve with three guides (blades): *a*, 3D model; *b*, main dimensions of the guides (blades).

Для осуществления подготовки модели клапанов к расчётам в Ansys, создавались конечные элементы (КЭ), так называемая сеточная модель, которая занимает важную роль, так как от неё зависит правильность и точность расчёта, построение сеточной модели проводилось в среде Ansys Mesh. Для модели клапана завода изготовителя использовалась гексаэдрическая сетка (рис. 6), с показателями качества элементов по Element Quality: Max — 0,99; Average — 0,31, по Skewness: Min —  $2,0434 \cdot 10^{-007}$ ; Average — 0,30. Для клапанов изменённой конструкции применялась тетраэдрическая сетка (рис. 7),

с показателями качества элементов по Element Quality: Max — 1; Average — 0,84, по Skewness: Min —  $6,3217 \cdot 10^{-005}$ ; Average — 0,22. Следовательно решение, полученное с помощью построенной сетки должно быть максимально приближённым, к нагрузкам оказываемым на клапан в действительности.

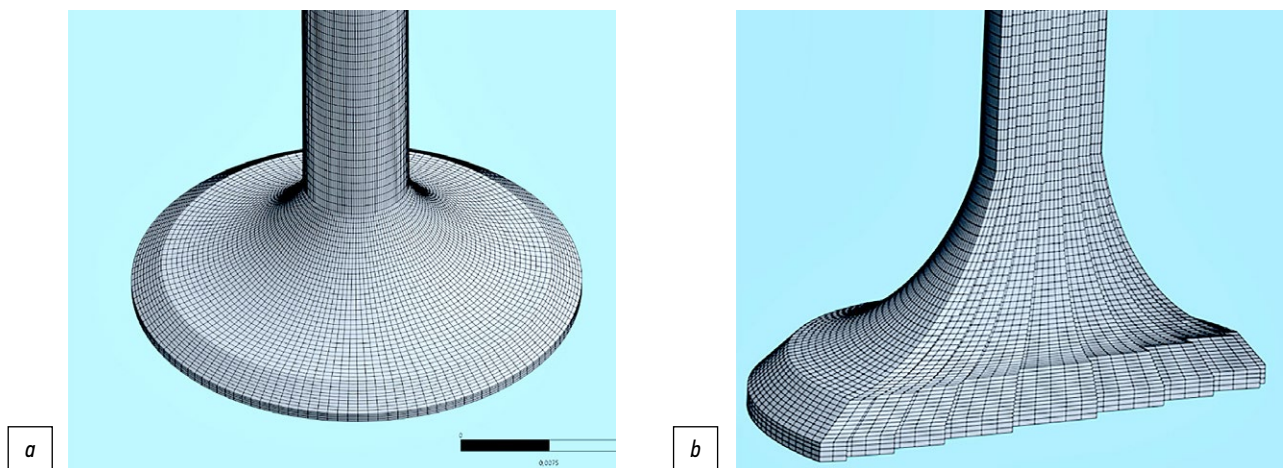
Последним этапом исследования был анализ полученных результатов и выводы.

При валидации результатов моделирования использовались зависимости температуры и давления от угла поворота коленчатого вала. Сравнение диаграмм, построенных



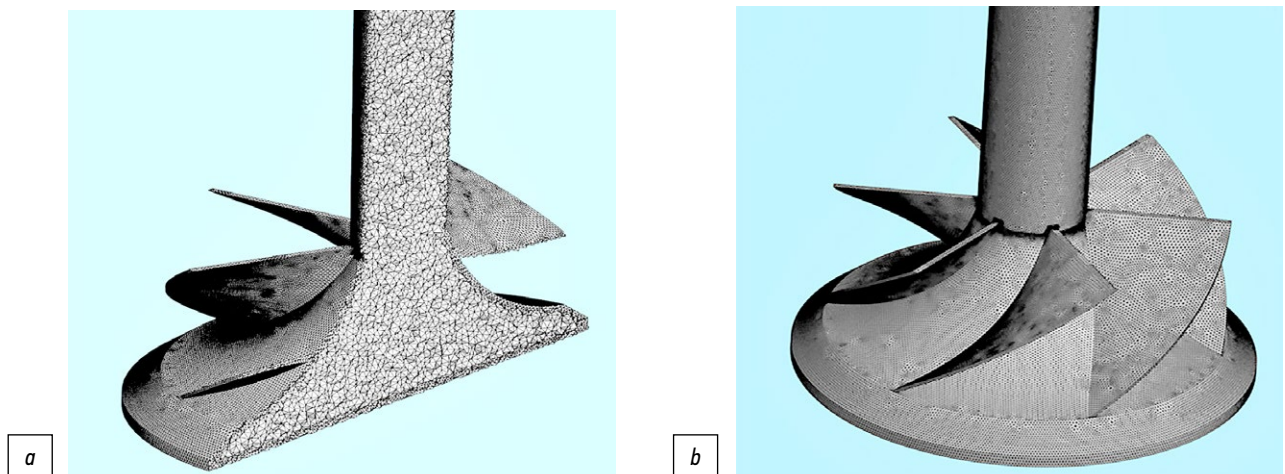
**Рис. 5.** Внешний вид исследуемого клапана с шестью направляющими (лопастями): *a* — выполненный в 3D модели; *b* — основные параметры направляющих (лопастей).

**Fig. 5.** View of a valve with six guides (blades): *a*, 3D model; *b*, main dimensions of the guides (blades).



**Рис. 6.** Конечно-элементная 3D-модель клапана завода изготовителя в среде Ansys.

**Fig. 6.** Finite element 3D model of the factory-built valve in the Ansys environment.



**Рис. 7.** Конечно-элементная 3D-модель клапана изменённой конструкции в среде Ansys.

**Fig. 7.** Finite element 3D model of the modified valve in the Ansys environment.

при нестационарном термомеханическом моделировании температуры и давления в ПК Ansys (рис. 8), с индикаторной диаграммой построенной в Дизель РК (см. рис. 2) не дали расхождений более чем 5%.

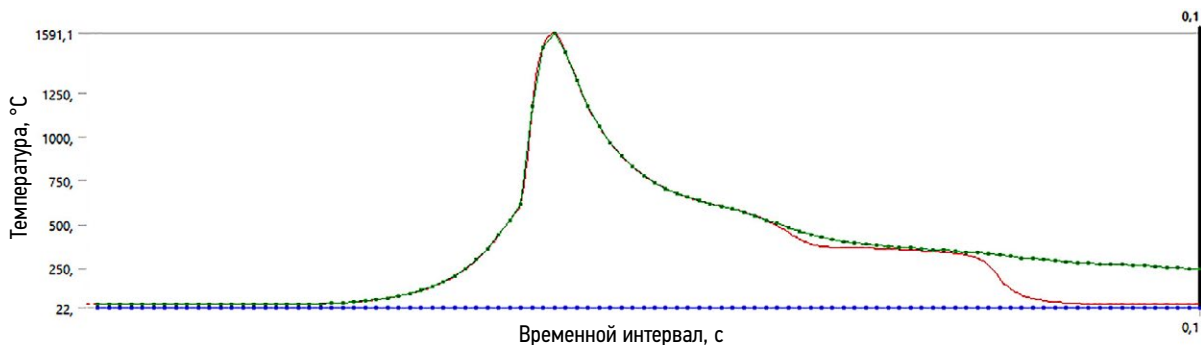
Временной интервал исследования составляет доли секунд, а именно согласно рис. 2 от 0,02 до 0,1 с. Результаты динамического термомеханического расчёта брались в наивысших, максимальных (max) нагрузках в данном временном интервале. По температуре максимум составил на временном отрезке 0,0419 с с наивысшей  $T = 1591,10^{\circ}\text{C}$ . Температура внешней среды

в момент исследований оставалась постоянной и равнялась  $22^{\circ}\text{C}$ .

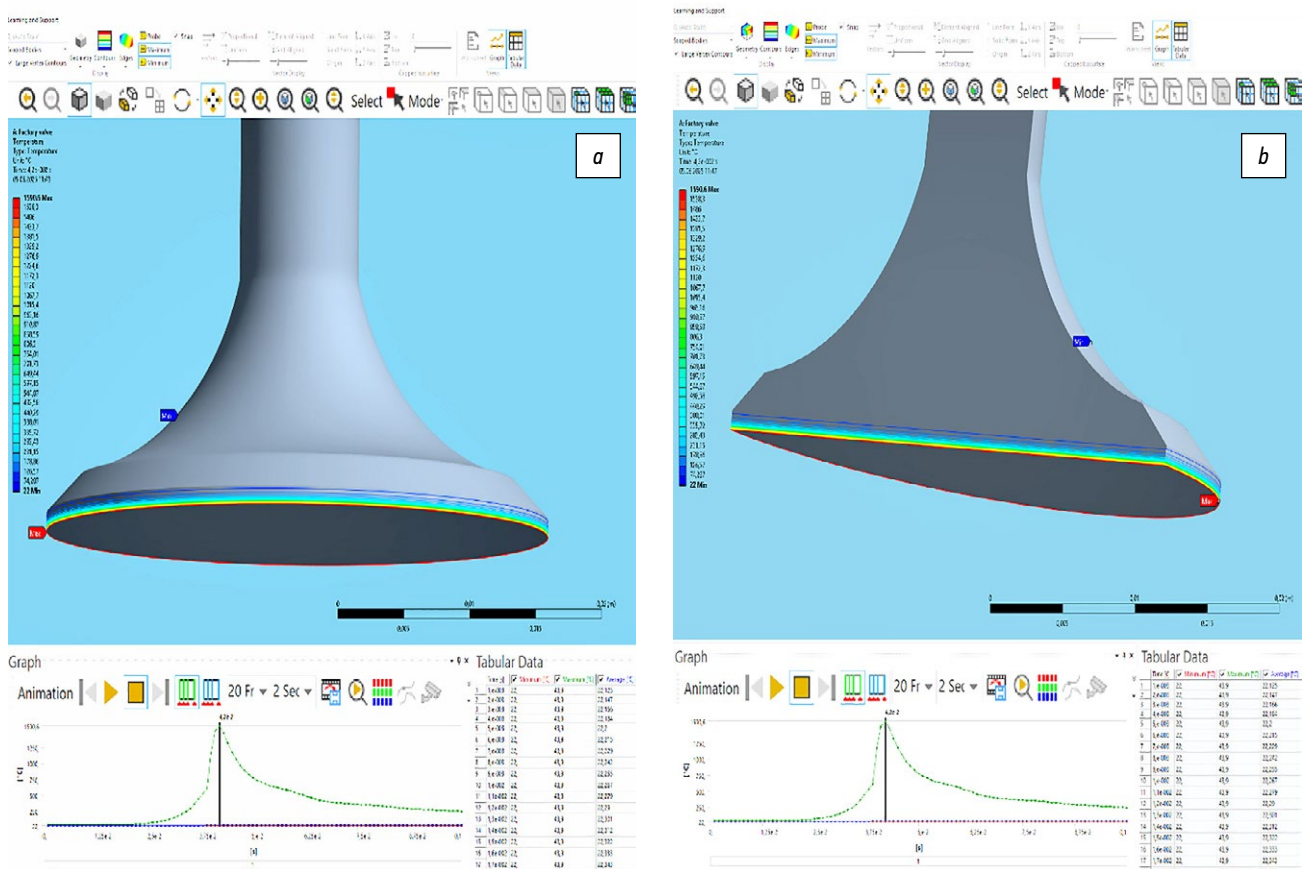
### Результаты моделирования и анализ

В результате проведённого моделирования были получены данные по распределению температуры внутри тарелок исследуемых клапанов, из стали 40X, которую имеется возможность просмотреть в любой момент исследуемого интервала рис. 9.

Выявлено, что даже за такой кратчайший промежуток воздействия максимальной температуры на тарелку



**Рис. 8.** График температуры, рассчитанной в среде Ansys.  
**Fig. 8.** Temperature graph calculated in Ansys environment.



**Рис. 9.** Распределение температуры на тарелке клапана завода изготовителя при max нагрузке: *a* — общий вид; *b* — в разрезе.  
**Fig. 9.** Temperature distribution on the factory-built valve tray at max load: *a*, general view; *b*, section.

клапана, она довольно глубоко распространяется вглубь тарелки на расстояние равное 4 мм рис. 10. На рисунке видно, что на тарелке клапана, обращённой в цилиндр, температура составляет 1590,6°C, далее — уменьшается. После расстояния в 1 мм температура составляет 60°C и начинает медленно падать до начального значения (окружающей среды) 22°C, это расстояние составляет более 3 мм рис. 8, *b*).

Плотность теплового потока на *max* составила 236,3 Вт/мм<sup>2</sup> см. рис. 11.

Исследование клапанов изменённой конструкции выявило, что имеющиеся на внешней стороне тарелки лопасти в количестве 3 и 6 штук, мало чем влияют на *T* оказываемую на клапан, не смотря на то что температура довольно глубоко распространяется вглубь тарелки, лопасти остаются с неизменной *T* внешней среды 22°C. Температура немного увеличивается у основания и составляет 22,227°C рис. 12.

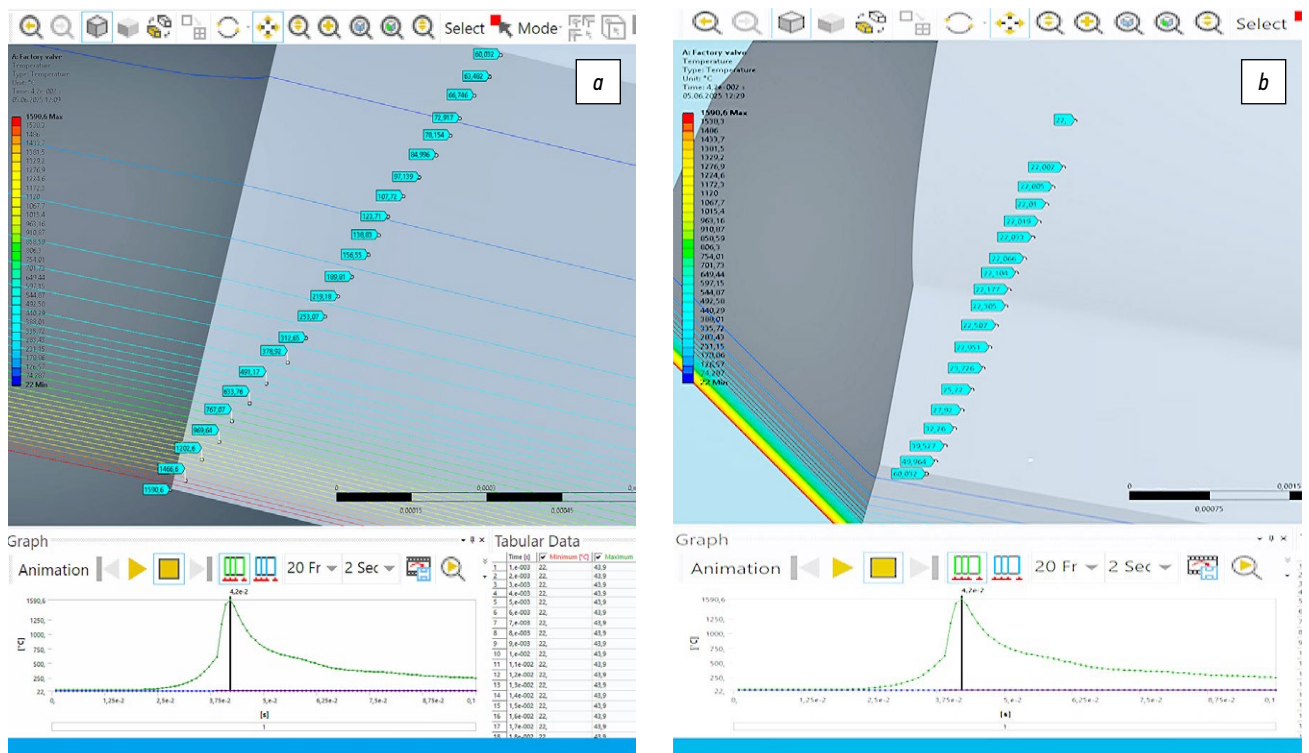
Это может быть вызвано тем, что влияние температуры слишком кратковременно (от 0,02 до 0,1 с) и нагрузка, прикладываемая к тарелке не циклична, а создаётся один раз. Для более точного анализа влияния температур на клапан с лопастями необходимо задавать более долгие временные интервалы, нагружая клапан циклическими возрастаниями *T*, нагревать его со средней *T* в цилиндре, тогда температурное поле возможно

будет частично поглощаться лопастями и, таким образом, убирать нагрузку с тарелки. В нашем случае этого замечено не было.

При изучении теплового потока в клапанах разных конструкций было выявлено, что тепловой поток увеличился в клапане с 3 лопастями и составил 283,12 Вт/мм<sup>2</sup>, а в конструкции с 6 лопастями он равен 281,49 Вт/мм<sup>2</sup> см. рис. 13. Этого следовало ожидать так как во первых масса самих клапанов изменилась, конструкция добавила дополнительные поверхности контактирующие с окружающей средой, что увеличивает теплоёмкость всей конструкции. Кроме того, возможно изменение пути тепла, тепло, идущее от нагретой части тарелки, частично ответвляется в лопасти, что так же приведёт к увеличению теплового потока.

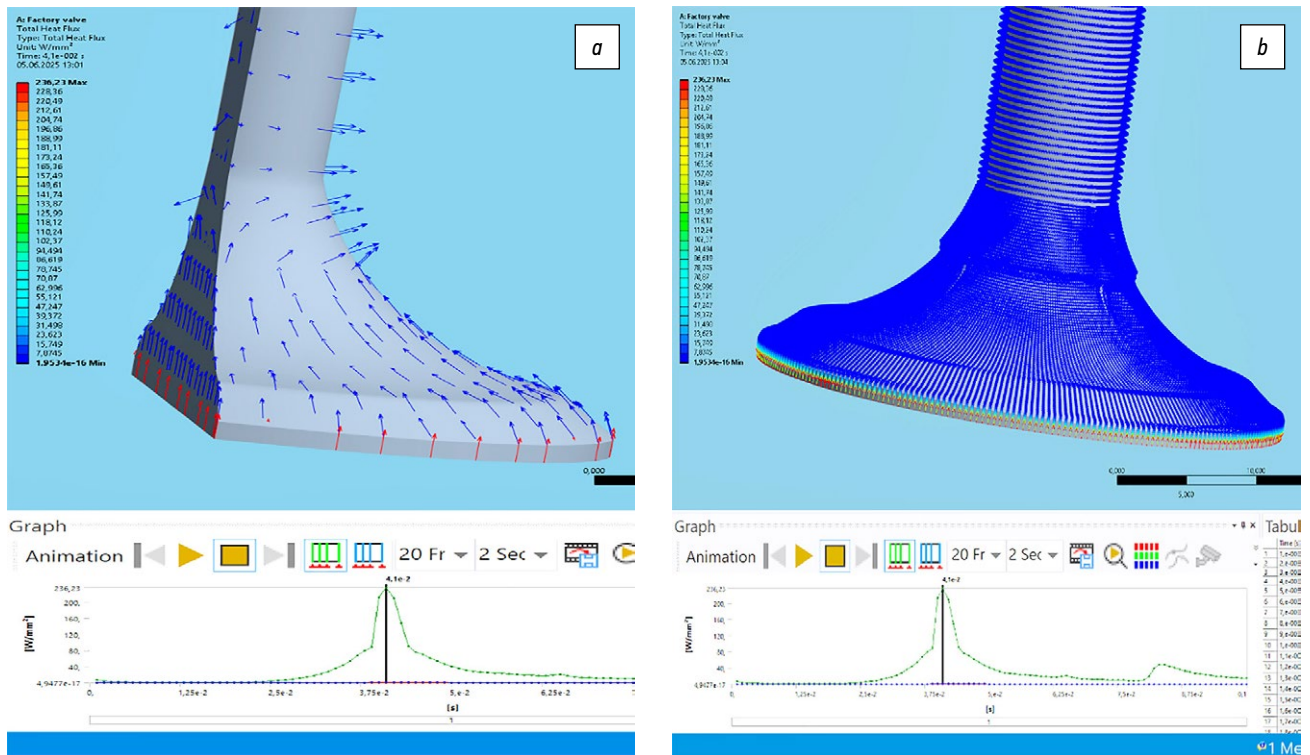
## Выводы

Исходя из проведённого первого этапа исследования, посвященного влиянию температуры на клапаны разных конструкций, необходимо в дальнейшем продолжить изучение, с целью выявления влияния высоких температур на клапан с направляющими (лопастями), т.к. мгновенная приложенная нагрузка не оказывает существенного воздействия на исследуемые объекты. Для этого необходимо создавать параметры внешнего

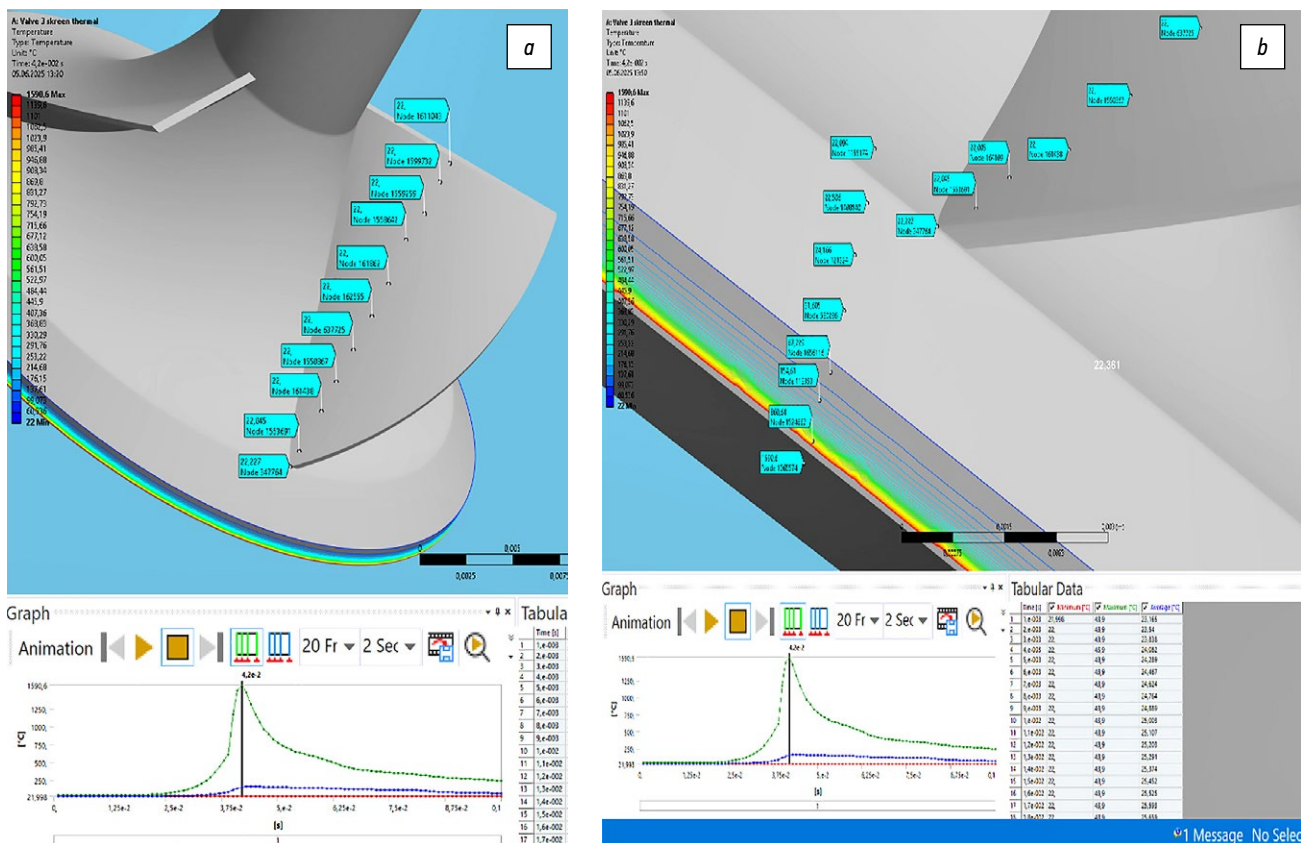


**Рис. 10.** Фрагмент распределения температуры внутри тарелки клапана от 1590,6°C до 60°C, данное расстояние от *max* до *min* температуры = 1 мм (*a*); распределение *T* от 60°C до 22°C, на расстоянии более 3 мм вглубь тарелки (*b*).

**Fig. 10.** Fragment of temperature distribution inside the valve tray from 1590.6 °C to 60 °C; the distance from *max* to *min* temperature = 1 mm (*a*); distribution of *T* from 60 °C to 22 °C at a distance of more than 3 mm inside the tray (*b*).

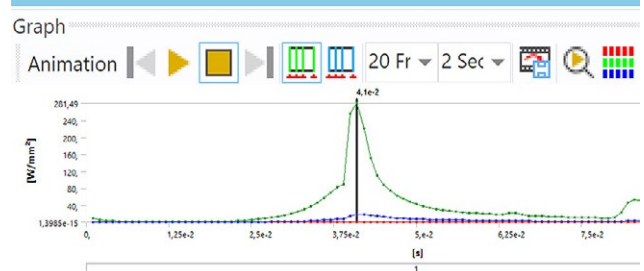
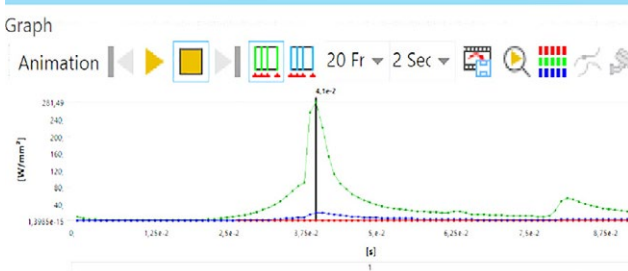
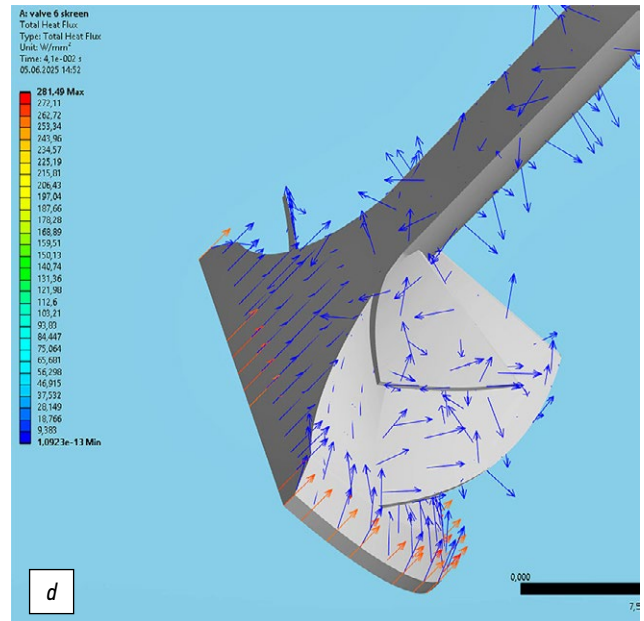
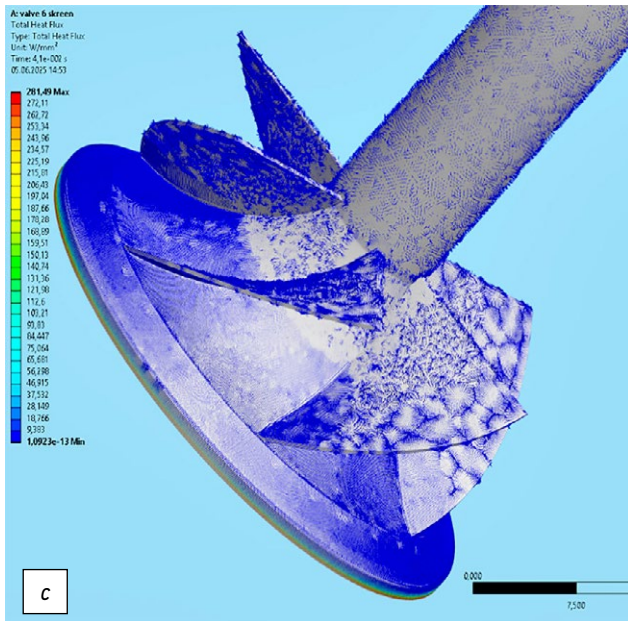
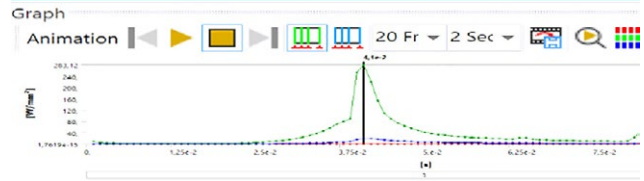
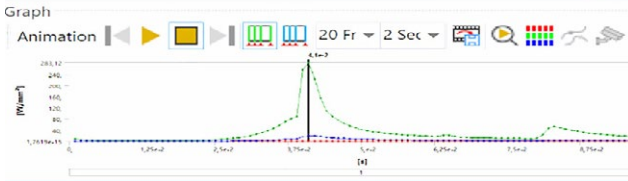
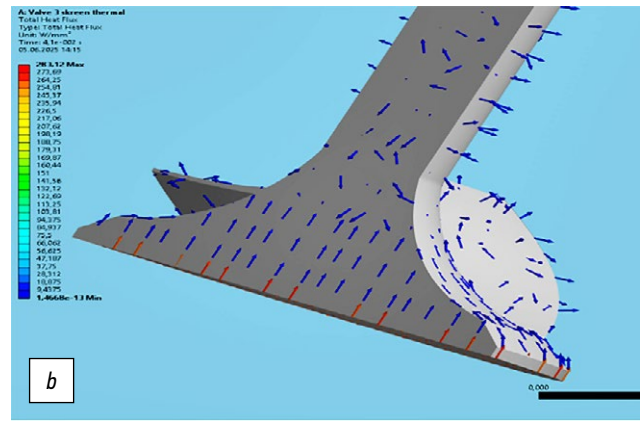
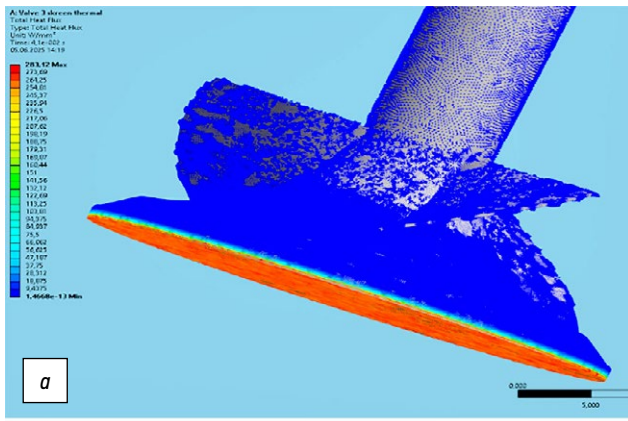


**Рис. 11.** Распределение теплового потока: *a* — в разрезе; *b* — в 3D.  
**Fig. 11.** Heat flux distribution: *a*, section; *b*, 3D view.



**Рис. 12.** Клапан с изменённой конструкцией с пробами *T* на лопасти от 22°C до 22,227°C (*a*); распределение *T* от дна тарелки до лопасти от 1590,6°C до 22°C (*b*).  
**Fig. 12.** Modified valve with *T* tests on the blade from 22 °C to 22,227 °C (*a*); *T* distribution from the bottom of the tray to the blade from 1590.6 °C to 22 °C (*b*).





**Рис. 13.** Визуализация движения теплового потока на клапане: *a, b* — с 3 лопастями; *c, d* — с 6 лопастями.  
**Fig. 13.** Visualization of heat flow on the valve: *a, b*, 3 blades; *c, d*, 6 blades.

воздействия (граничные условия) температурных режимов с наиболее долговременной нагрузкой и циклическостью, со средней температурой в цилиндре работающего СМД, чтобы наглядно рассчитать распределение температуры на клапане.

## ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ИНФОРМАЦИЯ

**Вклад авторов.** Личный вклад каждого автора: А.З. Курбанов — принял активное участие в создании и написании статьи, а также в подготовке и оформлении статьи; Н.М. Вагабов — принял активное участие

в подготовке и оформлении статьи, разработке схем и рисунков; Н.К. Санаев — принял активное участие в поиске и подготовке необходимой литературы, оформлении статьи; В.В. Егоров — проводил исследование, обобщил результаты, провёл анализ и принял активное участие в подготовке и оформлении статьи. Все авторы внесли существенный вклад в разработку концепции, проведение исследования и подготовку статьи, прочли и одобрили финальную версию перед публикацией.

**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 были использованы результаты исследований, проведенные аспирантом В.В. Егоровым.

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

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

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Румб В.К. Судовые двигатели внутреннего сгорания. Конструирование, расчёты прочности, износостойкости, долговечности. М., Вологда: Инфра-Инженерия, 2024.
2. Санаев Н. К., Тынянский В. П., Алимов С. А. Новая конструкция всасывающего клапана газораспределительного механизма судового малоразмерного дизеля // Вестник машиностроения. 2011. № 12. EDN: NCKLEN
3. Pandey A., Mandloi R.K. Effects of High Temperature on the Microstructure of Automotive Engine Valves // *Int. Journal of Engineering Research and Applications*. 2014. Vol. 4, N. 3 P. 122–126.
4. Дмитриев С.А., Хрулёв А.Э. Особенности моделирования температурного состояния впускных клапанов ДВС в задачах поиска причин неисправности // Проблемы тертя та зношування. 2019. № 1 (82). doi: 10.18372/0370-2197.1(82).13485 EDN: ITEIKZ
5. Cerdoun M., Khalfallah S., Beniaiche A., Carcasci C. Investigations on the heat transfer within intake and exhaust valves at various engine

## REFERENCES

1. Rumb VK. Marine internal combustion engines. Design, calculations of strength, wear resistance, durability. Moscow, Vologda: Infra-Engineering; 2024. (In Russ.)
2. Sanaev NK, Tynyansky VP, Alimov SA. New design of the suction valve of the gas distribution mechanism of a small-sized marine diesel engine. *Bulletin of Mechanical Engineering*. (In Russ.) 2011;12. EDN: NCKLEN
3. Pandey A, Mandloi RK. Effects of High Temperature on the Microstructure of Automotive Engine Valves. *Int. Journal of Engineering Research and Applications*. 2014;4(3):122–126.
4. Dmitriev SA, Khrulyov AE. Features of modeling the temperature state of internal combustion engine intake valves in the problems of finding the causes of malfunctions. *Problems of wear and tear*. 2019;1(82). (In Russ.) doi: 10.18372/0370-2197.1(82).13485 EDN: ITEIKZ
5. Cerdoun M, Khalfallah S, Beniaiche A, Carcasci C. Investigations on the heat transfer within intake and exhaust valves at various engine speeds. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2020;147. doi: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2019.119005

## ADDITIONAL INFORMATION

**Author contributions:** A.Z. Kurbanov: writing—original draft; writing—review & editing; N.M. Vagabov: writing—original draft, writing—review & editing, visualization; N.K. Sanaev: investigation, writing—review & editing; V.V. Egorov: investigation, formal analysis, writing—review & editing. All the authors made substantial contributions to the conceptualization, investigation, and manuscript preparation, and reviewed and approved the final version prior to publication.

**Funding sources:** No funding.

**Disclosure of interests:** The authors have no relationships, activities, or interests for the last three years related to for-profit or not-for-profit third parties whose interests may be affected by the content of the article.

**Statement of originality:** This paper used the studies conducted by postgraduate student V.V. Egorov.

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

**Provenance and peer review:** This paper was submitted unsolicited and reviewed following the standard procedure. The peer review process involved one reviewer, a member of the editorial board, and the in-house scientific editor.

speeds // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2020. Vol. 147. doi: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2019.119005

6. Keerthi Kumari Patnaik, Rao P.V. Effect of Curved Blade on Induction Swirl of an IC Engine CFD Analysis // *JETIR*. 2019 Vol. 6, N. 1.
7. Галиев И.П., Максимов Д. С. Влияние формы впускного клапана на характеристики воздушного вихря в цилиндре судового двигателя. В кн.: Научно-технический сборник российского морского регистра судоходства № 76. Санкт-Петербург, 2024. С. 96–105. EDN: IFYSSY
8. Руководство по эксплуатации. Дизели ч8,5/11 и ч9,5/11. М.: Внешторгиздат, 1975.
9. Санаев Н.К. Судовые малоразмерные дизели: конструкторско-технологические аспекты обеспечения технического уровня. Санкт-Петербург: Политехника, 2010. EDN: QNWLFR
10. Кавтарадзе Р.З. Локальный теплообмен в поршневых двигателях: учебник для вузов. М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2016. EDN: ZCOGVL
11. Овчинников С.В. Введение в теорию теплообмена: Теплопроводность в твёрдых телах. Саратов: СГУ им. Н.Г. Чернышевского, 2015.

**ОБ АВТОРАХ****Курбанов Али Зульпакарович,**

канд. техн. наук, профессор кафедры, Дагестанский  
государственный технический университет;  
eLibrary SPIN: 3867-2140;  
e-mail: kurbanov\_48@mail.ru

**Вагабов Нурулла Магомедович,**

канд. техн. наук, доцент кафедры, Дагестанский  
государственный технический университет;  
e-mail: vagabov01@inbox.ru

**Санаев Надир Кельбиханович,**

канд. техн. наук, доцент кафедры, Дагестанский  
государственный технический университет;  
e-mail: nurik909@mail.ru

**\* Егоров Валентин Валентинович,**

аспирант кафедры, Дагестанский государственный  
технический университет;  
адрес: Россия, 367015, Махачкала, пр. Имама Шамиля, д. 70;  
eLibrary SPIN: 2946-2612;  
e-mail: Vavilon.200@yandex.ru

**AUTHORS' INFO****Ali Z. Kurbanov,**

Cand. Sci. (Engineering), professor; Dagestan State  
Technical University;  
eLibrary SPIN: 3867-2140;  
e-mail: kurbanov\_48@mail.ru

**Nurulla M. Vagabov,**

Cand. Sci. (Engineering), Assistant Professor; Dagestan State  
Technical University;  
e-mail: vagabov01@inbox.ru

**Nadir K. Sanaev,**

Cand. Sci. (Engineering), Associate Professor; Dagestan State  
Technical University;  
e-mail: nurik909@mail.ru

**\* Valentin V. Egorov,**

postgraduate student; Dagestan State Technical University;  
address: 70 Imama Shamilya av, Makhachkala, 367015, Russia;  
eLibrary SPIN: 2946-2612;  
e-mail: Vavilon.200@yandex.ru

---

\* Автор, ответственный за переписку / Corresponding author

Оригинальное исследование

УДК 621.002.3

DOI: [https://doi.org/10.52899/24141437\\_2025\\_03\\_317](https://doi.org/10.52899/24141437_2025_03_317)

EDN: DJDWJU

# Исследование прочности полимерной матрицы под влиянием температурно-временного фактора

А.А. Соловьев

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

## АННОТАЦИЯ

**Актуальность.** Обширное распространение полимерных композитных (ПКМ) материалов в судостроительной отрасли подтолкнуло к изучению физико-механических свойств ПКМ и в том числе под влиянием температурно-временного фактора являются важными и своевременными. Это дополнительно подтверждается необходимостью совершенствования технологии использования полимеров в виде тонких антифрикционных покрытий в ответственных механизмах.

**Цель работы.** Исследование прочности полимерной матрицы под влияния температурно-временного фактора. Достижение цели обеспечивается решением следующих задач. Подготовкой материалов и образцов для проведения опытов. Изучением изменения полимерной матрицы при различных температурах спекания композита. Исследованием этапа синтеза (роста) прочности полимера. Созданием математических моделей роста прочности полимера при разных температурах от 200 до 350°C. Исследованием этапа падения прочности (деструкции) полимера.

**Методы.** В качестве объекта исследований был выбран высоко востребованный в последнее время полиамид марки ПА-6/66-3. Были использованы как теоретические методы исследования, так и эмпирический — высокотехнологичные опыты с использованием цифровых технологий и обработкой результатов с применением CAE программ.

**Результаты.** Определено, что температура спекания полимерного материала определяет скорость роста прочности, а зависимость скорости роста прочности от температуры носит линейный характер. Показаны графики зависимости предела прочности от времени спекания при различных температурах, а также произведена аппроксимация экспериментальных кривых. Выявлено, что термическая деструкция полимера протекает до обусловленных значений предела прочности и имеет выраженную точку перегиба.

**Выводы.** Определено, что закон роста-синтеза прочности можно представить как линейную зависимость от температуры спекания образцов. Касаясь вопроса об изменении коэффициентов в уравнении прямой скорости роста прочности, можно сказать, что они достоверно зависят от температуры плавления. Результаты исследований позволяют дать рекомендации по совершенствованию технологии изготовления изделий из дисперсного полиамидного материала.

**Ключевые слова:** полиамидная матрица; предел прочности; изменение прочности; скорость роста прочности; полимер; температура; разрушение.

## Как цитировать

Соловьев А.А. Исследование прочности полимерной матрицы под влиянием температурно-временного фактора // Труды Санкт-Петербургского государственного морского технического университета. 2025. Т. 4, № 3. С. 317–325. DOI: [10.52899/24141437\\_2025\\_03\\_317](https://doi.org/10.52899/24141437_2025_03_317) EDN: DJDWJU

Original Study Article

DOI: [https://doi.org/10.52899/24141437\\_2025\\_03\\_317](https://doi.org/10.52899/24141437_2025_03_317)

EDN: DJDWJU

# Investigation of Strength of Polymer Matrix Under the Influence of Temperature Time Factor

Alexander A. Solovev

State Marine Technical University, Saint Petersburg, Russia

## ABSTRACT

**BACKGROUND:** The widespread use of polymer composite materials (PCM) in the shipbuilding industry necessitated the study of the physical and mechanical properties of PCM, including under the influence of temperature time factor, which are important and timely. This is further supported by the need to improve the technology of using polymers in the form of thin antifriction coatings in critical machines.

**AIM:** To investigate the strength of polymer matrix under the influence of temperature time factor by preparation of materials and samples for experiments; study of changes in the polymer matrix at different composite sintering temperatures; study of the synthesis (growth) of polymer strength; building mathematical models of polymer strength growth at different temperatures from 200 to 350 °C; study of the polymer strength loss (destruction).

**METHODS:** PA-6/66-3 polyamide, which has been in high demand lately, was selected for the study. Both theoretical research methods and empirical ones were used, including high-tech experiments using digital technologies and processing using CAE software.

**RESULTS:** It was found that the sintering temperature of a polymer determined the strength growth rate and the dependence of the strength growth rate on temperature was linear. Dependence graphs of the tensile strength and the sintering time at various temperatures are shown and experimental curves are approximated. It was revealed that the polymer thermal degradation proceeded up to the specified tensile strength and had a pronounced inflection point.

**CONCLUSION:** The study shows that the law of strength growth (synthesis) can be represented as a linear dependence on the sintering temperature of the samples. We can conclude that the coefficients in the equation of the direct rate of strength growth depend significantly on the melting point. The study allows us to make recommendations on improving the manufacturing technology of dispersed polyamide products.

**Keywords:** polyamide matrix; tensile strength; strength change; strength growth rate; polymer; temperature; fracture.

## To cite this article

Solovev AA. Investigation of Strength of Polymer Matrix Under the Influence of Temperature Time Factor. *Transactions of the Saint Petersburg State Marine Technical University*. 2025;4(3):317–325. DOI: 10.52899/24141437\_2025\_03\_317 EDN: DJDWJU

Submitted: 17.06.2025

Accepted: 27.06.2025

Published online: 22.09.2025

## ВВЕДЕНИЕ

Исследованиям временной зависимости пластических масс посвящено достаточно много научных трудов отечественных и зарубежных ученых. Основателем термофлуктуационной теории твёрдых тел можно считать С.Н. Журкова [1]. Дальнейшее развитие этой теории получило в фундаментальном труде В.А. Петрова, А.Я. Башкарева, В.И. Веттегрена [2], В.В. Носова [3] и других отечественных ученых [4–8], которые проводили исследования применительно пар трения, на таких материалах, как полиамид ПА6, полиамид ПА66, полиамид ПА12, полиамид ПА54, полиамид ПА610.

В связи с интенсивным развитием водных и воздушных беспилотных изделий высокую востребованность получил спирторастворимый полиамид ПА-6/66-3. Он представляет собой продукты поликонденсации капролактама и соли АГ в различных соотношениях. Он устойчив к воздействию углеводородов (керосин, бензин и др.), кетонов, эфиров масел и щелочей. В виде порошка может быть использован в качестве покрытий на металлические поверхности.

Однако, для указанного полиамида ПА6/66-3, в литературе имеется ограниченное количество информации об использовании его в виде покрытий, получаемых из дисперсного порошка. Причем известные исследования посвящены вопросам адгезии. В тоже время недостаточно изученным остается вопрос поведения полиамида ПА6/66-3 в виде покрытия под влиянием температурно-временного фактора при наличии сил адгезии.

### Методика исследований

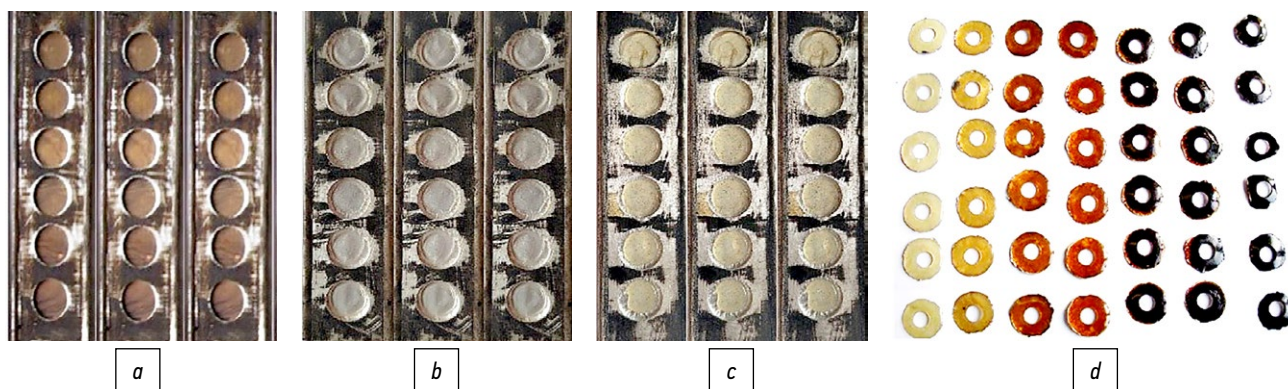
Для экспериментального определения предела прочности полиамида ПА6/66-3 под влиянием температурно-временного фактора необходимо соблюдение выполнения следующего алгоритма:

- изготовление кассетных матриц, при использовании которых можно было получать шесть образцов, для разрушения;

- просеивание полимерного порошка с целью получения одинаковых размеров частиц для всех образцов;
- преднамеренная выдержка в печи образцов при заданной температуре;
- экспериментальное установление предела прочности каждого образца;
- использованием САЕ программ для обработки полученных результатов, в частности для получения предела прочности.

Особенность конструкции кассеты заключается в том, что она состоит из тонкой медной пластины, алюминиевой фольги, калибратора размера образца и двух фиксаторов. Сборка кассеты осуществлялась в следующей последовательности. На медную пластину укладывалась алюминиевая фольга и затем присоединялась к калибратору. Все три детали скреплялись фиксаторами. Далее в отверстия калибратора засыпался полимерный порошок, излишки которого удалялись. Таким образом, каждый образец формировался из одинакового количества порошка, что обеспечивало одинаковую толщину расплавленного покрытия. С целью повышения производительности проведения экспериментов осуществлялась интеграция образцов в одну структурную единицу — устройство, показанное на рис. 1, как это было сделано в работах [5, 9]. Повышение точности исследований обеспечивалось за счет многократного разрушения одинаковых образцов, при этом, предел прочности находился в виде среднеарифметического от испытания шести образцов. Полученное значение соответствовало одной точке на графике.

Определение численных значений скорости синтеза и деструкции прочности полимера под действием теплового поля осуществлялось путем выдержки образцов в печи при следующих значениях температуры 200, 230, 260, 290, 320, 350°C. Неизменное значение температуры поддерживалось встроенной в печи вентиляцией, которая позволяла достигать разницу температур менее одного процента. Например, при температуре 230°C отклонение значений в любом месте печи не превышало 2°C.



**Рис. 1.** Структурная единица — устройство для объединения образцов: *a* — устройство с медной пластиной; *b* — устройство с медной пластиной и алюминиевой фольгой; *c* — устройство с оплавленным полимером; *d* — образцы после испытаний.

**Fig. 1.** Base unit (device used to combine samples): *a*, device with a copper plate; *b*, device with a copper plate and aluminum foil; *c*, device with molten polymer; *d*, samples after testing.

Продолжительность пребывания образцов в печи регистрировалось цифровым хронометром.

## ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Целью данного этапа эксперимента являлось обнаружение этапа синтеза прочности полимера и построение соответствующей кривой, определение точки перегиба и кривой термодеструкции. Для температур 360, 320, 290, 260 и 230°C достаточно было двенадцать интервалов температур выдержки образцов в печи для получения графиков синтеза и деструкции прочности полимера. Особые условия эксперимента потребовались для температуры оплавления полимера 200°C. В частности, для построения графика синтеза прочности достаточно было три интервала времени нагрева образцов в то время, как для определения графика деструкции полимера потребовалось 18 диапазонов термонагрузки. В целом за одну серию экспериментов разрушению подвергалось 480 образцов. Повышение точности экспериментов обеспечивалось трехкратным повторением опытов.

Численные значения роста и падения прочности, полученные в результате опытов, сделали возможным построение графиков зависимости прочности полимера при различных температурах оплавления порошка ПА 6/66-3 в зависимости от времени выдержки в печи представлены на рис. 2.

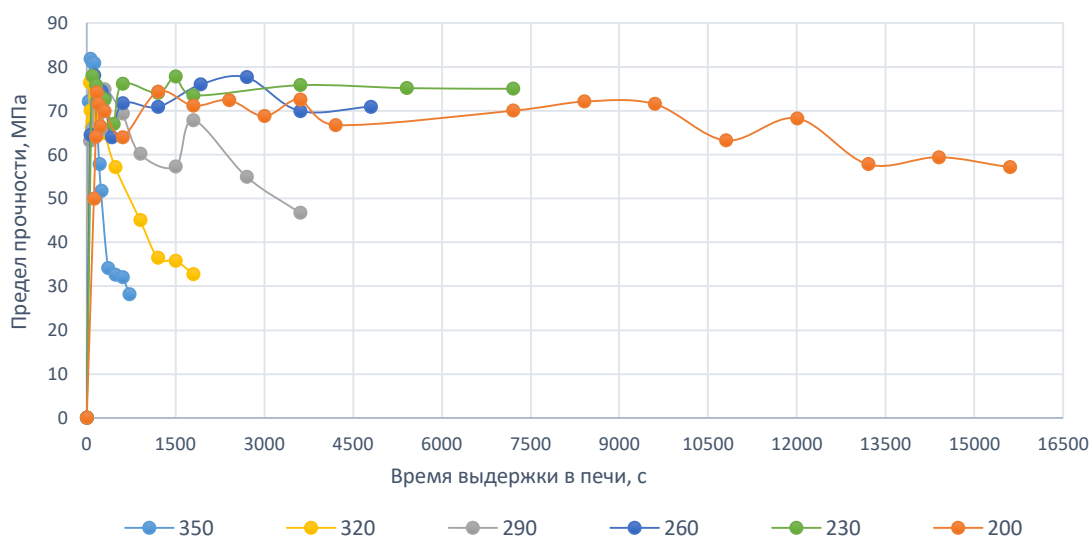
Анализ полученных зависимостей, представленных в виде графиков, позволяет установить физическую сущность процессов, протекающих в полимерном слое при оплавлении порошка. Для создания математических моделей, описывающих процессы изменения прочности от времени действия температуры, потребовались дополнительные опыты в диапазоне времени от 0 до 30 с

выдержки образцов в печи. В указанном диапазоне времени наблюдается синтез (рост) прочности полимера

По результатам эксперимента были получены данные, представленные в виде графических зависимостей. Для более полного изучения полученных результатов, необходимо было провести подробное математическое описание процесса изменения прочности в зависимости от времени выдержки образцов в печи. Здесь необходимо напомнить, что покрытие формировалось на тонкой алюминиевой фольге. Это осуществлялось умышленно с целью определения предела прочности полимера при наличии адгезионных связей. Этапы роста и падения предела прочности полимерного покрытия нужно рассматривать в отдельности.

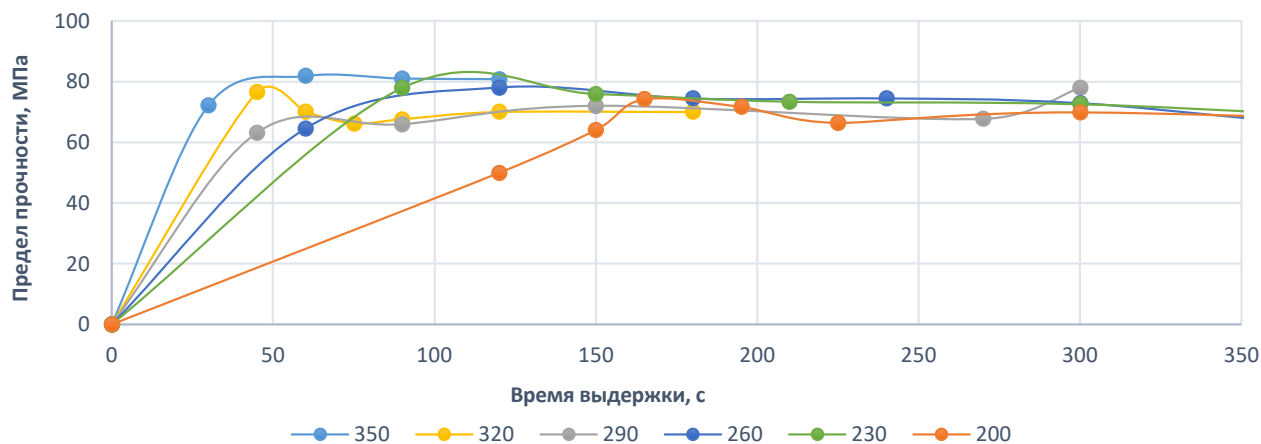
Долговечность — срок службы полимерного покрытия зависит от процесса синтеза прочности, поэтому математическое описание следует начать с этого процесса. На рис. 3 показаны результаты экспериментальных исследований. В диапазоне температур от 230 до 350°C, при которых протекает процесс оплавления частиц полимера, время синтеза — роста прочности составляет от 30 до 90 с. Фактически за это время полимерное покрытие приобретает максимальное значение предела прочности. Для построения линии тренда достаточно двух точек. Отдельно следует рассмотреть период оплавление полимера при температуре 200°C. Для получения качественной картины синтеза прочности и математической модели потребовалось четыре точки на графике в первые минуты нагрева образцов.

Приведенный график (рис. 3) показывает, что закон роста-синтеза прочности можно представить как линейную зависимость прочности на этапе оплавления порошка. Для математического описания периода синтеза прочности полимера требуется рассмотреть графики, представленные на рис. 4, характеризующие рост прочности.



**Рис. 2.** Графики изменения прочности во времени при различных температурах спекания полимера ПА 6/66-3.

**Fig. 2.** Graphs of strength behavior in time at different sintering temperatures of polymer P 6/66-3.



**Рис. 3.** Изменение прочности полимерного материала в диапазоне времени от 0 до 350 с.  
**Fig. 3.** Polymer strength behavior in the time range from 0 s to 350 s.

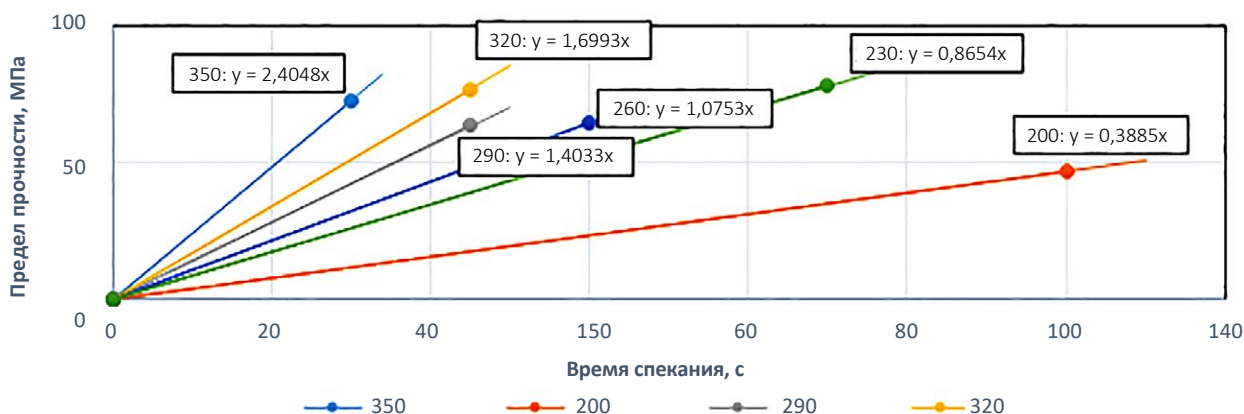
Для построения графиков во внимание принимались два численных значения при каждой температуре, одна из которых соответствовала нулевому значению предела прочности. Вторая точка соответствовала минимальному численному значению предела прочности, полученному за минимальное время оплавления порошка. Здесь за минимальное время оплавления принимается интервал времени, соответствующий началу пленкообразования, соответствующий процессу поперечной сшивки полимерных связей [5, 9].

Передача тепла полимерному порошку, как и многие процессы теплопередачи носит нестационарный характер. В связи с чем получение значений максимальной прочности полимерного покрытия требует знания минимального значения времени, в течение которого протекает этот процесс. Под наименьшим временем оплавления следует понимать такой интервал, который соответствует формированию пленкообразования за счет образования новых структурных групп и макромолекул [5, 9]. Наименьшее время, в процессе проведения эксперимента,

устанавливалось методом последовательных приближений. Данный метод основан на установлении времени, соответствующего не всеобъемлющему расплавлению частиц полимера. Партии образцов помещались в печь через определенные промежутки времени. Сначала на первых образцах определялось время полного оплавления полимерного порошка. Далее следующие образцы извлекались из печи раньше на 15–20 с. Применение метода последовательных приближений позволило получить точки, расположенные на прямой роста.

Уравнения прямой прочность — время, для разных температур оплавления полиамида приведены ниже:

- температура 350°C  $\sigma_B = 2,4048t$ , (1)
- температура 320°C  $\sigma_B = 1,6993t$ , (2)
- температура 290°C  $\sigma_B = 1,4033t$ , (3)
- температура 260°C  $\sigma_B = 1,0753t$ , (4)



**Рис. 4.** Зависимости роста прочности полимера от времени оплавления при разных температурах.  
**Fig. 4.** Dependences of polymer strength growth on melting time at different temperatures.



температуры 230°C

$$\sigma_B = 0,8654t, \quad (5)$$

температура 200°C

$$\sigma_B = 0,3885t, \quad (6)$$

где  $\sigma_B$  — предел прочности, МПа;  $t$  — время спекания, с. Коэффициент при времени спекания имеет размерность — МПа/с, что соответствует скорости роста-синтеза прочности.

Угол наклона прямых, согласно рис. 4, зависит от температуры. В свою очередь тангенс угла наклона прямой соответствует скорости роста прочности полимера при расплавлении отдельных частиц. График зависимости тангенса угла наклона прямой (скорости роста прочности) от времени спекания, приведен на рис. 5.

На рис. 5. вместе с экспериментальной зависимостью построена аппроксимирующая прямая, уравнение которой можно принять в виде:

$$V\sigma = 0,0123T - 2,0754, \quad (7)$$

где  $V\sigma$  — скорость роста прочности МПа/с;  $T$  — температура оплавления.

Таким образом, оказалось, что скорость роста прочности имеет линейную зависимость от температуры оплавления.

Используя данные математическим выкладкой можно сделать вывод о том, что температура оплавления полимерного порошка обуславливает скорость роста прочности. Зависимость скорости роста прочности от температуры представляет явно выраженный линейный характер.

Изменение коэффициентов в уравнениях прямых скорости роста прочности, подлинно показывают зависимость от температуры плавления.

Обобщая полученные результаты и делая вывод относительно этапа роста, можно сказать, что процесс роста прочности поддается достаточно простому математическому описанию.

Переходя к рассмотрению периода падения прочности, обратимся к графикам, построенным на основании опытов и изображенных на рис. 6.

На рис. 6. показаны графики зависимости предела прочности от времени спекания при различных температурах, а также произведена аппроксимация экспериментальных кривых. Первоначально, аппроксимация

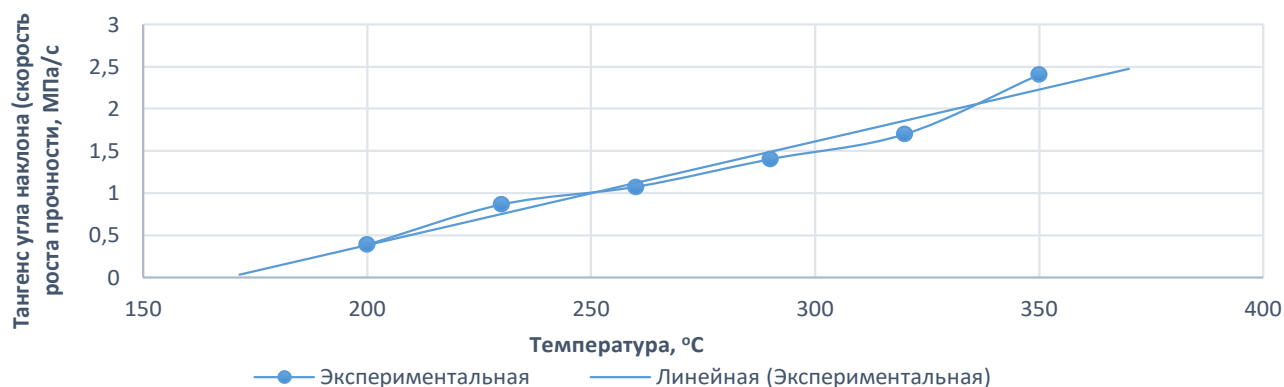


Рис. 5. Зависимость скорости роста прочности от температуры спекания.

Fig. 5. Dependence of strength growth rate on the sintering temperature.

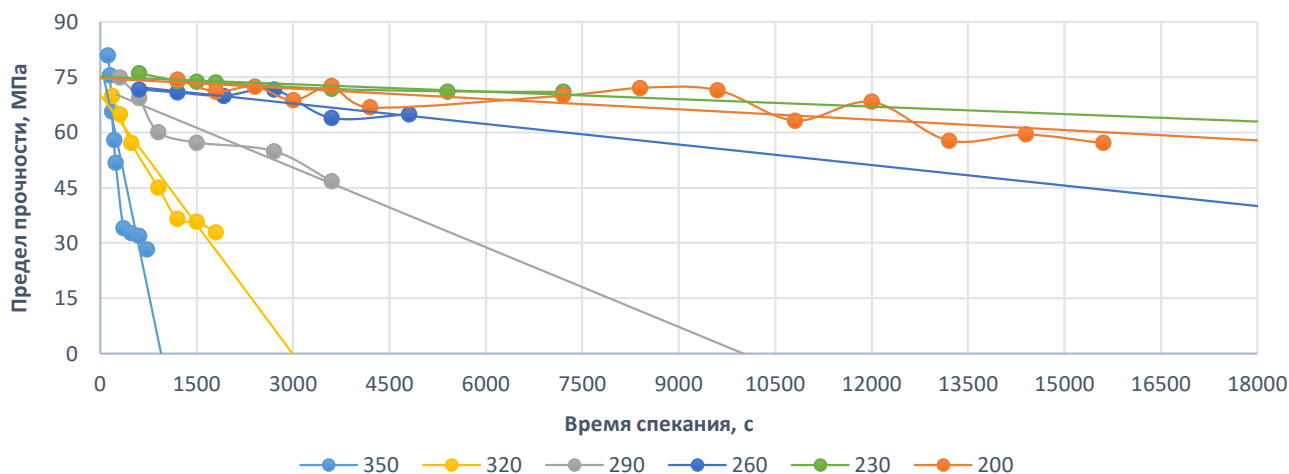


Рис. 6. Графики зависимости падения предела прочности от времени нахождения в печи при различных температурах спекания.

Fig. 6. Dependence graphs of tensile strength loss and the time spent in the furnace at different sintering temperatures.

производилась экспоненциальными контурами тренда, т.е. характер изменения прочности во времени казался, носил экспоненциальную выраженность, но после проведения уточняющих стадий эксперимента, пришли к мнению, что целесообразнее перейти к линейному характеру.

По экспериментальным данным были построены аппроксимирующие прямые описывающие зависимость изменения предела прочности от времени спекания полимера, которые могут быть описаны следующими выражениями:

При температуре 350°C 
$$\sigma_B = -0,0840909t + 79,5414780, \quad (8)$$

При температуре 320°C 
$$\sigma_B = -0,0234812t + 70,2245071, \quad (9)$$

При температуре 290°C 
$$\sigma_B = -0,0072032t + 72,0640143, \quad (10)$$

При температуре 260°C 
$$\sigma_B = -0,0018547t + 73,4126772, \quad (11)$$

При температуре 230°C 
$$\sigma_B = -0,0006742t + 75,1000949, \quad (12)$$

При температуре 200°C 
$$\sigma_B = -0,0009374t + 74,7189685, \quad (13)$$

где  $\sigma_B$  — предел прочности полимера;  $t$  — время нахождения образцов в печи.

Для построения математической модели процесса падения прочности, как и в случае ее роста, необходимо определить зависимость тангенса угла наклона прямой (скорости падения прочности) от температуры спекания. Остается вопрос, как объяснить, предел прочности при температуре 200°C падает больше, чем при температуре 230°C. Необходимо более тщательно проанализировать участок падения предела прочности.

Проведение дополнительных, уточняющих экспериментов участка падения прочности рис. 7 показали ранее не обнаруженные результаты.

Оказывается, термическая деструкция полимера протекает до обусловленных значений предела прочности и имеет выраженную точку перегиба. Причем как до неё, так и после графики описываются линейными зависимостями. Однако точка перегиба имеет численные значения, находящиеся ниже допустимых предельных значений.

При рассмотрении уточняющих графиков, наблюдаются участки, на которых уже практически не наблюдается падения прочности полимера. Таким образом, можно считать, что падение предела прочности достигает какого-то значения, в нашем случае это порядка 32–35 МПа.

Из уравнений прямых (см. рис. 7) видно, что свободный член уравнения для температуры спекания 350°C (102,39 МПа) отличается от свободных членов других линейных уравнений ( $\approx 73$  МПа). Такое отличие можно объяснить тем фактом, что на реальных графиках изменения предела прочности во времени переход с участка роста на участок падения происходит плавно. Кроме того, можно сказать, что имеется участок, на котором предел прочности фактически не меняется. Данный участок при различных температурах имеет свои временные рамки существования, но при построении математической модели пренебрегаем этим участком, вследствие его малого существования по времени спекания. Из-за пренебрежения этим участком, в теоретической модели происходит смещение по временной оси прямой падения прочности, что приводит к уменьшению значения свободного члена линейного уравнения прямой падения. После проведения уточняющих мероприятий, можно построить график зависимости скорости падения прочности от температуры спекания. Данная зависимость приведена на рис. 8.

Из рис. 8 видно, что зависимость скорости падения предела прочности от температуры спекания носит экспоненциальный характер и описывается выражением:

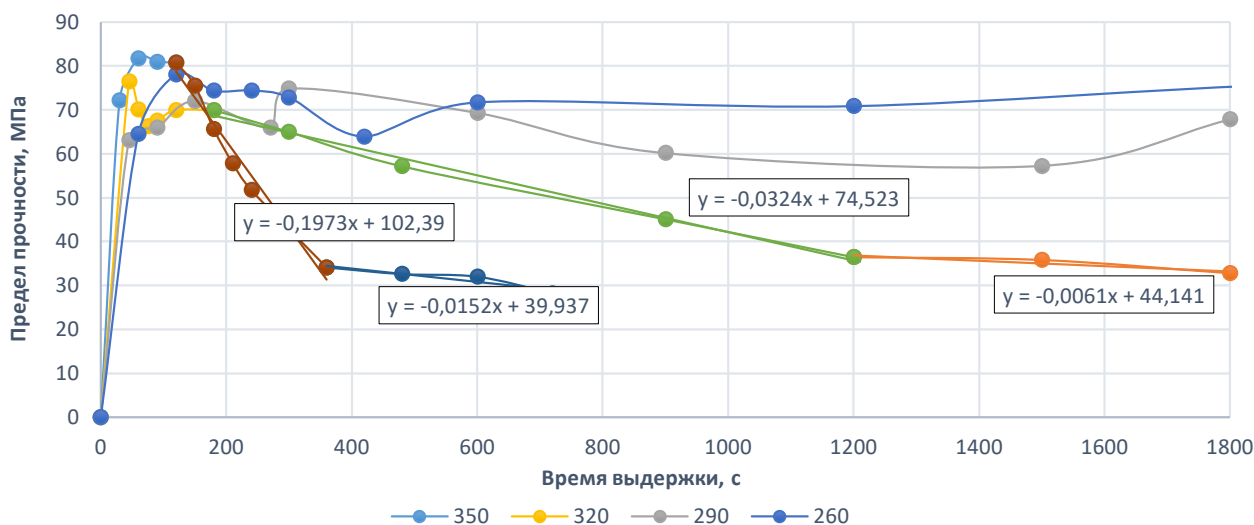
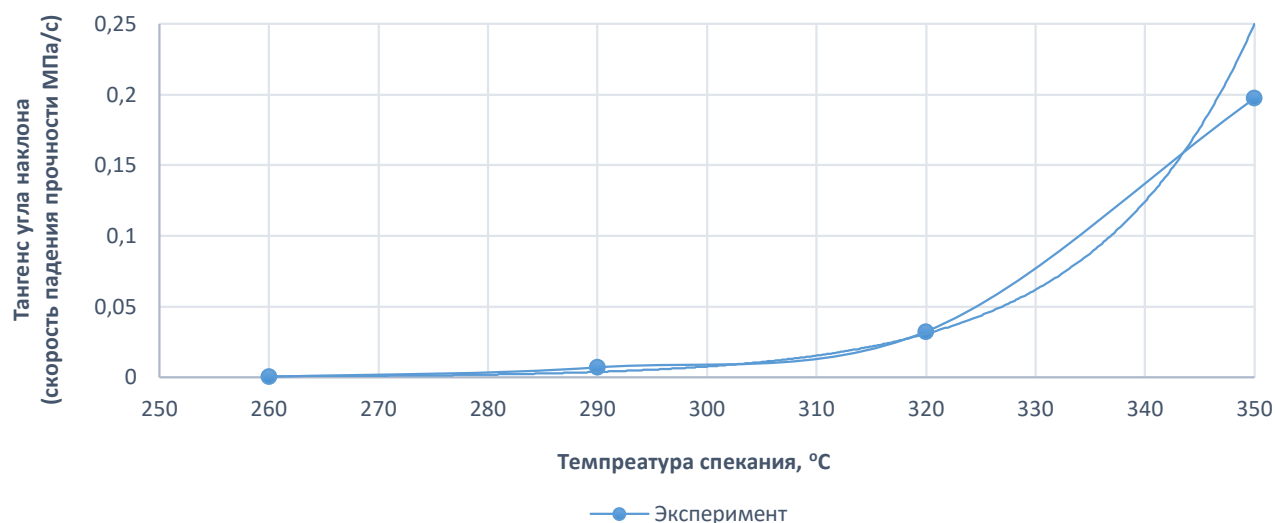


Рис. 7. Уточняющие графики.  
Fig. 7. Refinement graphs.



**Рис. 8.** График зависимости скорости падения прочности от температуры спекания.

**Fig. 8.** Dependence graph of strength loss rate and the sintering temperature.

$$V_{\sigma_{II}} = 6e^{-12e^{0,0698}T}, \quad (14)$$

где  $V_{\sigma_{II}}$  — скорость падения прочности МПа/с;  $T$  — температура спекания.

Относительно экспоненциального закона зависимости скорости падения прочности — деструкции полимера от температуры спекания, можно сказать следующее: на экспоненциальной кривой можно выделить два участка, на которых поведение скорости падения прочности существенно отличаются. Так для температур спекания меньше 300–310°C, скорость падения прочности достаточно мала, а для температур ниже 240–250°C скорость падения прочности вообще близка к нулю.

## ВЫВОДЫ

Таким образом, установлено, что закон роста-синтеза прочности можно представить как линейную зависимость от температуры спекания образцов. Указанная температура определяет скорость роста прочности, причем зависимость скорости роста прочности от температуры носит явно выраженный линейный характер.

Касаясь вопроса об изменении коэффициентов в уравнении прямой скорости роста прочности, можно сказать, что они достоверно зависят от температуры плавления.

На основании проведенных экспериментов можно дать рекомендации применительно технологии изготовления изделий из дисперсного полиамидного материала по достижению оптимальным режимов переработки его в изделия. Например, если учесть, что температура плавления составляет порядка 170°C, то оптимальные рамки для осуществления температурных воздействий на полимерное изделие составляют 200–240°C.

## ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ИНФОРМАЦИЯ

**Вклад авторов.** Автор статьи одобрил ее рукопись (версию для публикации).

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

**Конфликт интересов.** Авторы декларируют отсутствие 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 рецензент, член редакционной коллегии и научный редактор издания.

## ADDITIONAL INFORMATION

**Author contributions:** The author approved the version of the manuscript to be published.

**Funding sources:** No funding.

**Disclosure of interests:** The author has no relationships, activities, or interests for the last three years related to for-profit or not-for-profit third parties whose interests may be affected by the content of the article.

**Statement of originality:** No previously obtained or published material (text, images, or data) was used in this study or article.

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

**Provenance and peer review:** This paper was submitted unsolicited and reviewed following the standard procedure. The peer review process involved one reviewer, a member of the editorial board, and the in-house scientific editor.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Журков С.Н., Нарзулаев Б.Н. Временная зависимость прочности твердых тел // ЖТФ. 1953. Т. 23, № 10. С. 1677–1688.
2. Петров В.А., Башкарев А.Я., Веттегрень В.И. Физические основы прогнозирования долговечности конструкционных материалов. СПб.: Политехник, 1993.
3. Носов В.В. Принципы акустико-эмиссионной диагностики процесса разрушения // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. 1994. № 7–9. С. 7.
4. Сагалаев Г.В., Симонов-Емельянов И.Д. Оценка свойств межфазного слоя в наполненных системах // Пластические массы. 1989. № 3. С. 48–51.
5. Стукач А.В., Соловьев А.А. Прочность и адгезия наполненных порошками и фуллереном C60 полиамидов. СПб.: Изд.-полгр. асс. высш. уч. зав., 2020. EDN: GYPTTD
6. Бартнев Г.М., Лаврентьев В.В. Трение и износ полимеров. Л.: Химия, 1972.
7. Берг Л.Г. Введение в термографию. М.: Наука, 1969.
8. Айсс Н.С. Трение и изнашивание полимеров. В кн.: Трибология: Исследования и приложения: опыт США и стран СНГ. М.: Машиностроение; Нью-Йорк: Аллертон пресс, 1993. С. 176–189.
9. Соловьев А.А. Влияние эксплуатационных факторов на адгезионную прочность антифрикционных покрытий. В кн.: Актуальные проблемы морской энергетики: материалы одиннадцатой международной научно-технической конференции. СПб.: СПбГМТУ, 2022. doi: 10.52899/9785883036322\_385\_388 EDN: URYVVGX

## REFERENCES

1. Zhurkov SN, Narzulaev BN. The time dependence of the strength of solids. *ZhTF*. 1953;23(10):1677–1688.
2. Petrov VA, Bashkarev AY, Vettegren VI. *Physical foundations of forecasting the durability of structural materials*. Sankt Petersburg: Polytechnic; 1993. (In Russ.)
3. Nosov VV. Principles of acoustic emission diagnostics of the process of destruction. *Proceedings of higher educational institutions. Mechanical engineering*. 1994;7–9:7. (In Russ.)
4. Sagalaev GV, Simonov-Emelyanov ID. Evaluation of the properties of the interfacial layer in filled systems. *Plastic masses*. 1989;3:48–51. (In Russ.)
5. Stukach AV, Soloviev AA. *Strength and adhesion of polyamides filled with powders and fullerene C60*. Sankt Petersburg : Izd.-poligr. ass. vyssh. uch. zav.; 2020. (In Russ.)
6. Bartenev GM, Lavrentiev VV. *Friction and wear of polymers*. Leningrad: Khimiya; 1972. (In Russ.)
7. Berg LG. *Introduction to thermography*. Moscow: Nauka; 1969. (In Russ.)
8. Aiss NS. Friction and wear of polymers. In: *Tribology: Research and applications: the experience of the USA and CIS countries*. New York: Allerton Press, 1993:176–189.
9. Soloviev AA. The influence of operational factors on the adhesive strength of antifriction coatings. In: *Actual problems of marine energy: materials of the eleventh International Scientific and Technical Conference*. Sankt Petersburg: SPbGMTU; 2022. (In Russ.)

## ОБ АВТОРЕ

**Соловьев Александр Александрович**,  
старший преподаватель кафедры деталей машин и подъемно-транспортных механизмов, аспирант, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет;  
адрес: Россия, 190121, Санкт-Петербург, ул. Лоцманская, д. 3;  
eLibrary SPIN: 9393-1497;  
e-mail: asolneva@mail.ru

## AUTHOR INFO

**Alexander A. Soloviev**,  
Senior Lecturer at the Department of Machine Parts and Lifting and Transport Mechanisms, graduate student, Saint Petersburg State Marine Technical University,  
address: 3 Lotsmanskaya st, 190121, Saint Petersburg, Russia;  
eLibrary SPIN: 9393-1497;  
e-mail: asolneva@mail.ru

Научный обзор

УДК 629.124

DOI: [https://doi.org/10.52899/24141437\\_2025\\_03\\_327](https://doi.org/10.52899/24141437_2025_03_327)

EDN: MOPIIF

# Обзор методов численного моделирования скоростного ледового сопротивления

М.А. Бережная, Н.В. Тряскин, С. Юй, Б. Чжао

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

## АННОТАЦИЯ

Стремительное развитие судоходства в арктическом регионе создает повышенную потребность в специализированных судах высокого ледового класса, приводит к поиску новых и совершенствованию существующих методов моделирования движения судов в ледовых условиях. Составление математической модели взаимодействия судна со льдом является сложной задачей с точки зрения моделирования свойств льда и единого верного подхода в выборе модели льда не существует, но предлагается большое количество методов, способных решить с достаточной точностью определенные задачи. Известные на сегодняшний день методы численного моделирования взаимодействия судна и льда, несмотря на свою эффективность, имеют существенные ограничения, связанные с высокой вычислительной стоимостью и ограниченной точностью, что определяет актуальность их дальнейшего совершенствования. Поиск оптимальных комбинаций различных численных методов и повышение эффективности вычислительных процессов становится ключевым направлением исследований для повышения безопасности и экономической эффективности арктического судоходства. Проведен комплексный анализ и систематизация существующих методов численного моделирования взаимодействия судна со льдом, а также определение перспективных направлений их совершенствования для повышения эффективности арктического судоходства. Данный обзор включает сравнительный анализ преимуществ и недостатков каждого метода (DEM, FEM, SEM, SPH, PD, LBM), а также оценку их применимости для решения конкретных задач моделирования взаимодействия судна со льдом. В ходе работы рассмотрены следующие аспекты применения методов: вычислительная эффективность, точность моделирования процессов, области оптимальной применимости. Систематизированы основные методы численного моделирования взаимодействия судна со льдом; выявлены общие характеристики всех рассмотренных методов; определены ключевые направления совершенствования существующих подходов; сформулированы рекомендации по определению ледового сопротивления и перечислены программные пакеты для реализации методов моделирования; установлена необходимость дальнейших исследований в области оптимизации вычислительных процессов и повышения точности моделирования взаимодействия судов со льдом. В обзоре сформулированы рекомендации по выбору метода моделирования движения судна во льду. Однако все существующие методы имеют свои ограничения, что приводит к необходимости их развития: разработка комбинированных подходов, оптимизация вычислительных процессов.

**Ключевые слова:** численное моделирование; ледовое сопротивление; метод конечных элементов; метод дискретных элементов; метод когезионных элементов; метод гидродинамики сглаженных частиц; метод пиродинамике; метод решеточного Больцмана.

## Как цитировать

Бережная М.А., Тряскин Н.В., Юй С., Чжао Б. Обзор методов численного моделирования скоростного ледового сопротивления // Труды Санкт-Петербургского государственного морского технического университета. 2025. Т. 4, № 3. С. 327–340. DOI: 10.52899/24141437\_2025\_03\_327 EDN: MOPIIF

Review

DOI: [https://doi.org/10.52899/24141437\\_2025\\_03\\_327](https://doi.org/10.52899/24141437_2025_03_327)

EDN: MOPIIF

# Methods of Numerical Modeling of High-Velocity Ice Resistance: A Review

Mariya A. Berezhnaya, Nikita V. Tryaskin, Xinyan Yu, Bowen Zhao

Saint Petersburg State Marine Technical University, Saint Petersburg, Russia

## ABSTRACT

The rapid development of shipping in the Arctic region has increased the demand for special ice-class vessels, leading to the search for new and improved methods for modeling ship movement in ice conditions. Developing a mathematical model of ship-ice interaction is a complex task due to the challenges in simulating ice properties and there is no single universally accepted approach to ice modeling. However, numerous methods are available that can solve specific problems with sufficient accuracy. Despite their effectiveness, known numerical modeling methods for ship-ice interaction have significant limitations related to high computational costs and limited accuracy, highlighting the need for further improvement. The search for optimal combinations of different numerical methods and improving computational efficiency has become a key research area to improve the safety and cost efficiency of Arctic shipping. To conduct a comprehensive analysis of and systematize existing numerical modeling methods for ship-ice interaction and identify promising areas for their improvement to improve the efficiency of Arctic shipping. The review includes a comparative analysis of the advantages and disadvantages of each method (DEM, FEM, CEM, SPH, PD, and LBM) and an assessment of their applicability for solving specific ship-ice interaction modeling problems. The following aspects of method application were examined: computational efficiency, simulation accuracy, and optimal applications. The authors systematized the main numerical modeling methods for ship-ice interaction; identified common characteristics of all studied methods; determined key areas for improving existing approaches; developed recommendations for determining ice resistance, and made a list of software packages to implement modeling methods. The study highlights the need for further research in optimizing computational processes and improving the accuracy of ship-ice interaction modeling. This review provides recommendations for selecting a method to model ship movement in ice. However, all existing methods have their limitations, necessitating further development, including the development of combined approaches and the improvement of computational processes.

**Keywords:** numerical modeling; ice resistance; finite element method; discrete element method; cohesive element method; smoothed particle hydrodynamics method; peridynamics method; lattice Boltzmann method.

## To cite this article

Berezhnaya MA, Tryaskin NV, Yu X, Zhao B. Methods of Numerical Modeling of High-Velocity Ice Resistance: A Review. *Transactions of the Saint Petersburg State Marine Technical University*. 2025;4(3):327–340. DOI: [10.52899/24141437\\_2025\\_03\\_327](https://doi.org/10.52899/24141437_2025_03_327) EDN: MOPIIF

Submitted: 20.06.2025

Accepted: 21.07.2025

Published online: 22.09.2025

## ВВЕДЕНИЕ

На сегодняшний день существует три основных подхода к исследованию вопросов, связанных с движением судов в ледовых условиях: эмпирические методы, основанные на экспериментальных данных, для решения задач взаимодействия судна со льдом; методы численного моделирования, описывающие динамику взаимодействия судна и льда на основе уравнений движения судна; аналитические методы. Многие исследователи комбинируют эти подходы для устранения ограничений каждого из них [1].

Несмотря на то, что данные о ледовом сопротивлении, полученные в ходе натурного эксперимента [2–5], являются полными, диапазон параметров достаточно узок. Поэтому при обработке натурных данных достаточно сложно судить о влиянии различных параметров на ледопроницаемость. Модельные испытания в ледовых бассейнах также считаются надежными [6–10]. Однако и те и другие достаточно строги в отношении используемого оборудования и экспериментальных установок. Аналитические методы обычно основаны на многочисленных допущениях и упрощениях, например, формы тела и модели льда [11–13]. Математический эксперимент обладает определенными преимуществами перед физическим (натурными испытаниями): меньшая стоимость и независимость от периода проведения модельных испытаний. При использовании численного моделирования все используемые параметры могут быть скорректированы согласно требованиям. Кроме того, можно проследить чувствительность получаемых результатов в зависимости от изменения характеристик сред. В отличие от экспериментальных и аналитических методов численные более упрощенно распространяются на различные конфигурации тела.

Выделяют следующие методы численного моделирования, используемые при моделировании взаимодействия корпуса судна со льдом: метод дискретных элементов (discrete element method, DEM), метод конечных элементов (finite element method, FEM), метод когезионных элементов (cohesive element method, CEM), метод гидродинамики сглаженных частиц (smoothed particle hydrodynamics, SPH), метод перидинамики (peridynamics, PD), метод решеточного Больцмана (lattice Boltzmann method, LBM).

Общим недостатком всех вышеперечисленных моделей является их высокая вычислительная стоимость. Кроме того, точность некоторых численных методов ограничена в определенных условиях, например, в рамках моделей сплошной среды могут возникать проблемы с сингулярностью производных на поверхности и в вершинах трещин.

## МЕТОД КОНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ (FEM)

Метод конечных элементов – относительно зрелый метод, который реализован в различном программном обеспечении для решения задач механики сплошных сред. Основной задачей метода является построение

корректной механической модели и выбор соответствующей реологической модели морского льда. Примеры реологических моделей, разработанных на основе трехмерной упругопластической теории: модель материала льда S-2 [14], описывающая как сплошной, так и битый лед; модель льда для экспериментальных масштабов, предназначенная для лабораторных исследований; анизотропная модель повреждений, способная моделировать хрупкое разрушение льда.

Для повышения точности моделирования взаимодействия судна со льдом в FEM были интегрированы некоторые алгоритмы моделирования жидкостей, такие как метод Эйлера-Лагранжа [15] и Эйлера-консольный метод [16]. Кроме того, в последние годы адаптивный подход к FEM в сочетании с SPH считается эффективным методом моделирования взаимодействия морских сооружений со льдом [17]. Эта методика позволяет конвертировать конечные элементы в частицы в зависимости от заданных условий. На рис. 1 представлены результаты численного моделирования, на которых видно образование накопленного льда в носовой части судна, а также различия, возникающие в зависимости от формы судна.

Ким и др. [9, 18] получили сопротивление грузового судна, идущего по каналу с битым льдом, расчет произведен в программном обеспечении (ПО) LS-DYNA. Результаты показали хорошее согласование между модельными испытаниями в ледовом бассейне и численным моделированием.

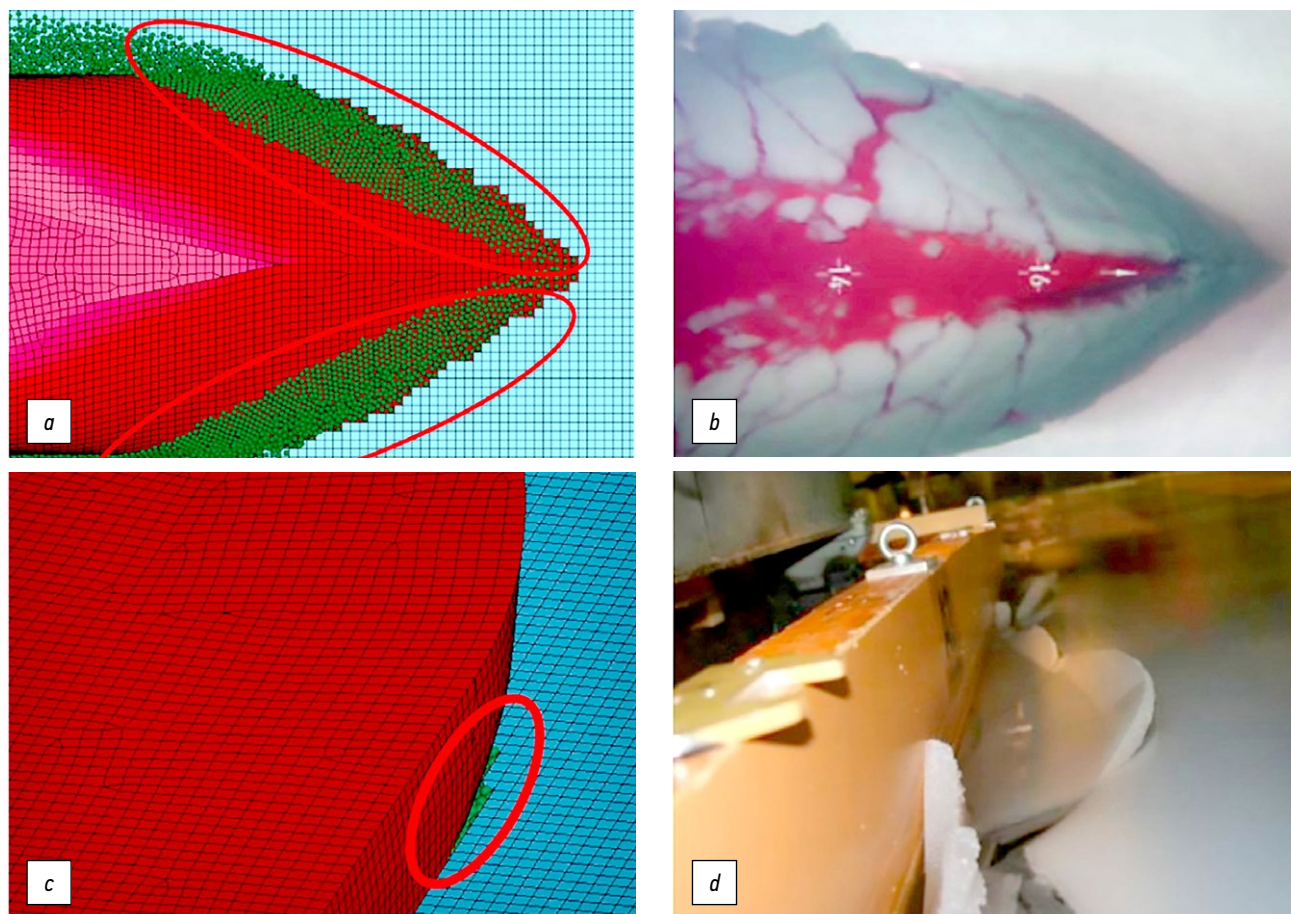
Исследование нагрузок, возникающих на корпусе авианосца, движущегося в узком канале, рассмотрено в [19]. В данной статье на основе SPH-FEM создана численная имитационная модель соединения лед-вода-корабль, которая реализует моделирование скольжения дробленого льда вдоль корпуса после прорыва ледового канала.

В [20] рассмотрены льдины со случайным распределением размера, толщины и формы. Результаты показали, что с увеличением сплоченности льда и скорости движения судна возрастает сила удара льда. Численные и экспериментальные результаты хорошо согласуются с точки зрения средней ледовой нагрузки, за исключением малых скоростей при сплоченности 80%.

Оценка достоверности расчета движения судна во льдах различной сплоченности методом FEM дает удовлетворительное согласие между численным моделированием и экспериментами данными с точки зрения как наблюдаемых явлений, так и количественных значений.

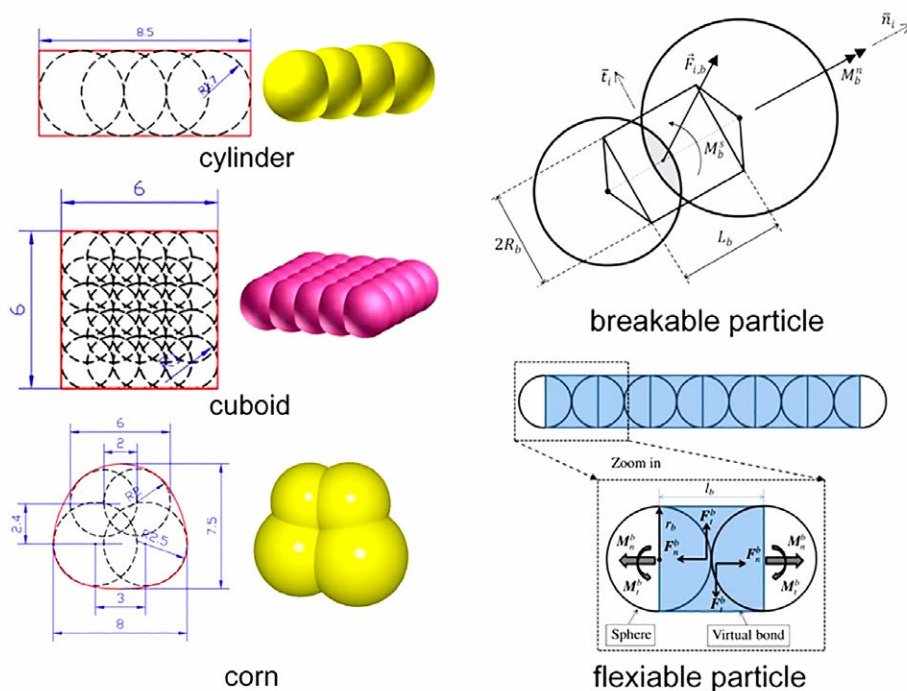
## МЕТОД ДИСКРЕТНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ (DEM)

Метод DEM сформулирован И. Кандаллом и И. Стрэком [21, 22], он позволяет моделировать и анализировать динамические характеристики плавучего и битого льда, а также описывать структуру льда в микромасштабе и моделировать разрушение льда в процессе взаимодействия



**Рис. 1.** Накопление обломков льда в носовой и боковой частях ледокола при взаимодействии со сплошным льдом [17]: *a, c* — численное моделирование, *b, d* — эксперимент.

**Fig. 1.** Accumulation of ice debris in the bow and lateral parts of an icebreaker when interacting with solid ice [17]: *a, c*, numerical modeling; *b, d*, experiment.



**Рис. 2.** Базовая модель сферических частиц метода дискретных элементов [23].

**Fig. 2.** Basic model of spherical particles (discrete element method) [23].



судна со льдом. Такие частицы соединены связями, которые заданы прочностью на растяжение и сдвиг (рис. 2). Во время моделирования рассчитываются напряжения растяжения и сдвига между частицами, при превышении предела прочности происходит разрыв связи.

Несмотря на простоту реализации, DEM требует дальнейшего развития для улучшения описания вращения и скольжения частиц. Это особенно важно для точного моделирования сложных сценариев взаимодействия льда с судном, в которых важную роль играют вращательные и касательные движения частиц льда. Поскольку лед дискретизируется на большое количество частиц, DEM требует больших вычислительных затрат и времени, особенно при моделировании крупномасштабных ледяных покровов. Дискретный масштаб частиц льда оказывает большое влияние на результаты моделирования. Если масштаб частиц слишком велик, невозможно отразить детальный процесс разрушения льда; если масштаб слишком мал, вычислительные затраты резко возрастают.

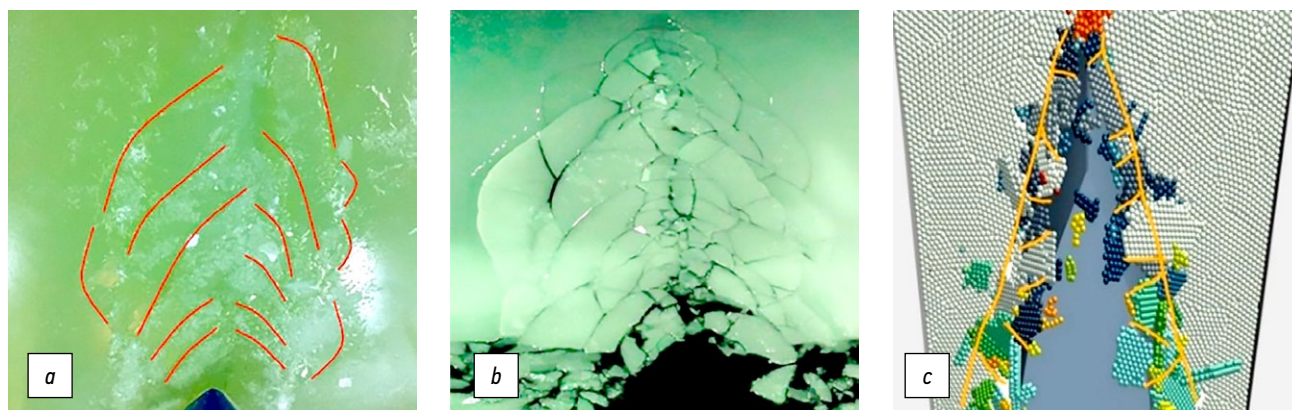
В численном моделировании большой проблемой является создание хрупкого сплошного льда на свободной поверхности (рис. 3). В [24] авторы частично решают эту проблему с использованием одностороннего сопряжения метода вычислительной гидродинамики и дискретных элементов. Наблюдается процесс распространения радиальных и кольцевых ледяных трещин.

## СОВМЕСТНАЯ МОДЕЛЬ FEM – DEM

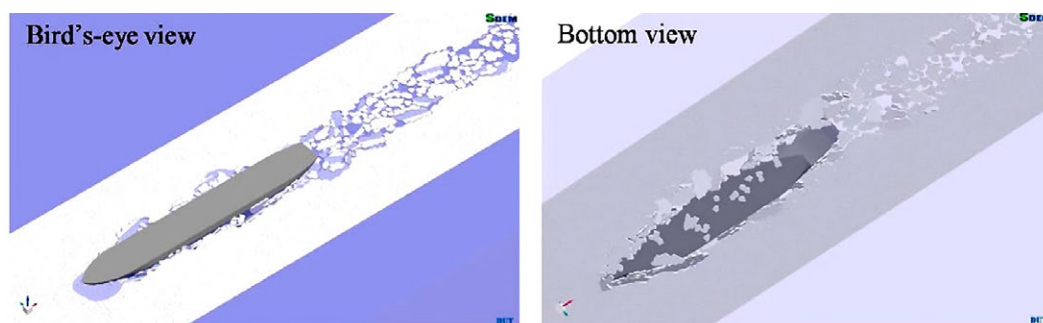
Использование совместной модели позволяет комбинировать преимущества каждой из них при моделировании взаимодействия судна и льда. FEM хорошо справляется с описанием деформаций льда, включая его упругие и пластические изменения при взаимодействии с корпусом судна. DEM позволяет моделировать процессы разрушения льда и поведение его отдельных фрагментов после раскола, что особенно полезно при моделировании дробления и перемещения льдин. Такой совместный подход обеспечивает непрерывный переход от сплошной среды к дискретным элементам, что позволяет более точно описывать полный процесс разрушения льда и его взаимодействие с судном (рисунок 4).

Для повышения эффективности вычислений в совместной модели применяется мультишаговый подход во времени и пространстве. Этот подход позволяет решать задачу с разными шагами по времени для различных частей расчётной области, избегая постоянного использования слишком мелких временных шагов, что могло бы значительно снизить производительность.

При применении правильных критериев разрушения во время моделирования движения судна во льду можно определить, должно ли оно вызвать разрушение льда или нет. Таким образом, моделирование DEM можно



**Рис. 3.** Сравнение ледовых повреждений между модельными испытаниями [24]: *a, b* — эксперимент; *c* — численное моделирование.  
**Fig. 3.** Comparison of ice damage between model tests [24]: *a, b*, experiment; *c*, numerical modeling.



**Рис. 4.** Моделирование навигации судна в плоском льду с помощью FEM – DEM [26].  
**Fig. 4.** Modeling of ship navigation in flat ice using FEM–DEM [26].

улучшить, включив в него разлом льда, тем самым охватив случаи движения судов как в мелких льдинах, так и в крупных. В [25] отмечается удовлетворительное использование подобного подхода при моделировании движения ледокольного конуса с различными углами наклона и носовой части ледокольного судна в различных ледовых условиях, частицы DEM моделируются как сферические. Пример моделирования частиц многогранниками методом DEM рассмотрено в [26].

Поток жидкости может влиять на силу взаимодействия между судном и битым льдом [27]:

- вызывая движение кусков битого льда через кильватерную и носовую волны судна;
- ускоряя и демпфируя движение льда;
- воздействуя на распределение напряжения внутри льдины;
- влияя на контакты между скользящими кусками льда и корпусом корабля, тем самым изменяя общее сопротивление.

Эти факторы влияют, в том числе, на оценку сопротивления местных ледовых нагрузок. Большинство существующих моделей учитывают влияние потока жидкости довольно упрощенно, как правило, с эмпирически добавленными коэффициентами массы и сопротивления, которые не способны отразить гидродинамику корабля. К более сложным методам моделирования относятся LBM и CFD. Первый может моделировать поток, вызванный судном. По сравнению со стандартным CFD, LBM гораздо реже применяется для решения гидродинамических задач судов и не прошел валидацию. Исключение потоков жидкости может существенно повлиять на прогноз ледового сопротивления [28], поскольку судовое течение может оттеснить лед в сторону, что значительно уменьшит сопротивление. Результаты моделирования некоторых моделей [27] несколько выше результатов эксперимента, что, возможно, связано с исключением эффекта обтекания. Поэтому предлагается совмещать DEM с CFD для получения более надежных результатов.

Далее будут рассмотрены исследования, в которых моделирование льда выполнялось с помощью метода дискретных элементов, а поток с помощью CFD.

Моделирование движения корабля в плавучих льдинах рассмотрено в работе [28], использованы алгоритмы распределения льдин, написанные в MatLab, с помощью которых генерируются естественные поля и внедряются в модель CFD&DEM. Моделирование движения корабля в открытой воде и метод DEM реализованы в программном обеспечении STAR-CCM+. Авторы выделяют две основные особенности естественного распределения льдин: льдины представляют собой смесь разных размеров и местоположение каждой льдины должно быть определено случайным образом. Битый лед моделируется дискообразными частицами. В результате авторами получены данные по сопротивлению, отличающиеся не более чем на 10% от эксперимента с использованием синтетического льда.

Tsarau, A., Loset, S. [29] исследовали взаимодействие океанского течения при наличии битого льда на сооружение. Авторы используют модель потенциального потока для прогнозирования движения льда вверх по потоку от сооружения и метод вихревых элементов используется для моделирования вихревых потоков, переносящих битый лед вниз по течению в следе. Лед рассматривается либо как ансамбль дискретных твердых тел, либо как совокупность частиц, взвешенных на поверхности воды. Разработанная модель не проходит валидацию, основным достижением является качественное совпадение результатов моделирования с наблюдениями, полученными в ходе испытаний в ледовых бассейнах. Моделирование ледяной крошки многогранниками частицами рассмотрено в [30], однако данная работа показывает только возможность моделирования взаимодействия судна с битым льдом, результаты не сравниваются с физическими измерениями.

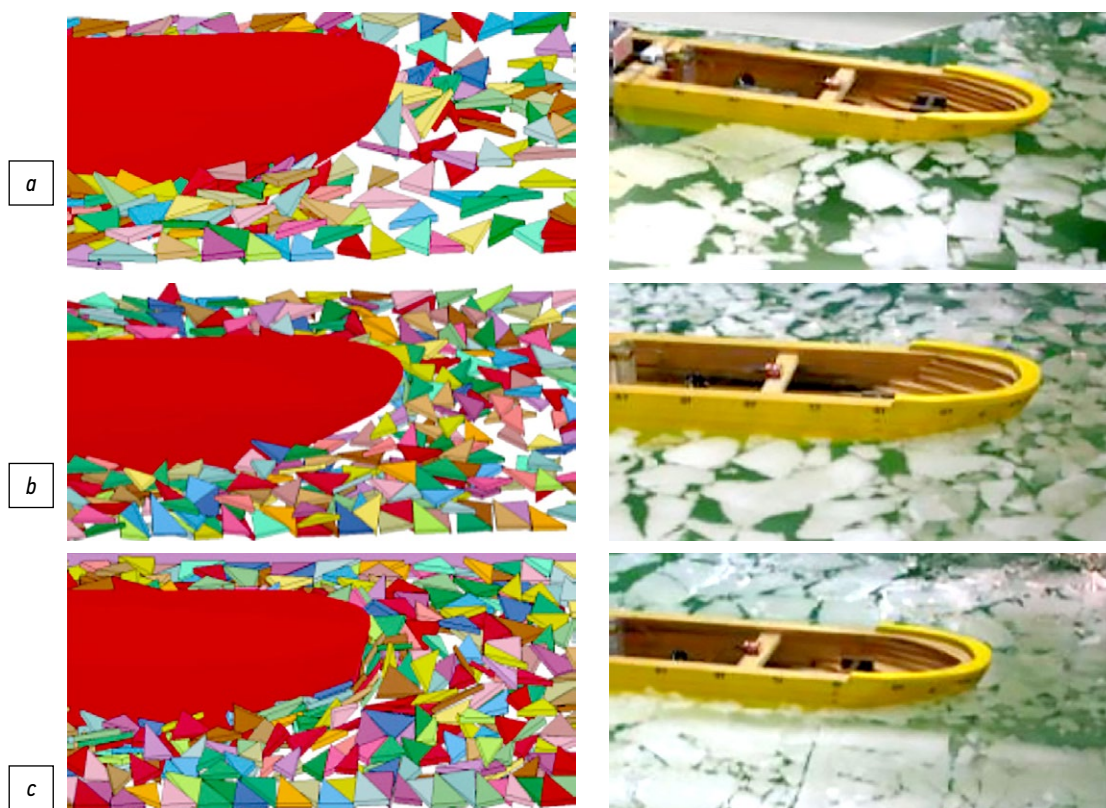
Применение формулировки Эйлера-Лагранжа рассмотрено в работах [9, 20]. Поток жидкости моделируется с использованием эйлеровой формулировки, в то время как структура льда считается лагранжевой. В [9] лед моделируется поэлементно в форме прямоугольного треугольника как твердое тело (рисунок 5). Наблюдается хорошее согласование между численными и экспериментальными результатами как качественное, так и количественное.

Важность выбора формы битого льда при численной оценке ледопроеходимости подчеркивается в [31] (рис. 6). Авторами рассчитано суммарное ледовое сопротивление, рассмотрено три модели контакта судна со льдом. Максимальная погрешность общего сопротивления находится в пределах 5,5%.

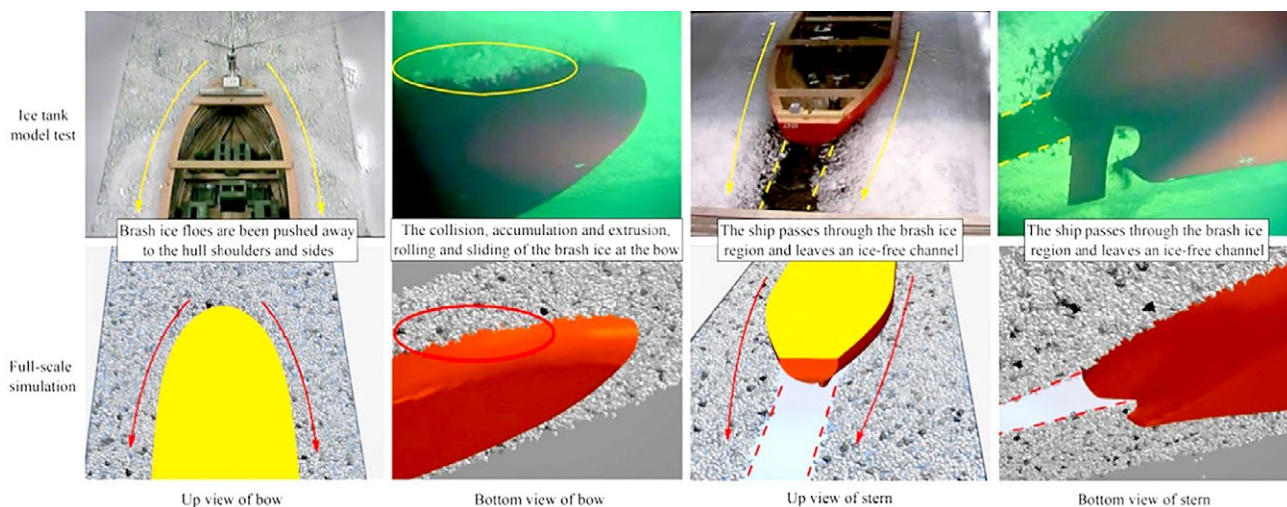
Также оценка влияния скорости модели и сплоченности льда на ледопроежимость оценивается в работе [32]. В указанной работе материал льда определен как упругий, лед моделируется прямоугольниками. По результатам моделирования процентное отклонение математического эксперимента от физического не превышает 15%.

Влияние случайного и фиксированного распределения плавучего льда при его различных концентрациях (рис. 7) рассмотрено в [33], авторами сделаны выводы о том, что случайное распределение плавучего льда имеет большее сходство и лучшую точность, чем фиксированное распределение.

Сопротивление ледоходу в ледовых условиях с применением DEM и CFD методов исследуется в [34]. Изучено сопротивление судна, идущего по полям битого льда в масштабе модели с учетом силы трения битого льда, а также сопротивления вод и гидродинамической силы битого льда. Ошибка между результатами численного моделирования и результатами испытаний составляет менее 5%. Исследовано и подтверждено влияние коэффициента трения судна о лед, толщины льда, формы льда, ширины канала битого льда и концентрации льда на сопротивление судна.



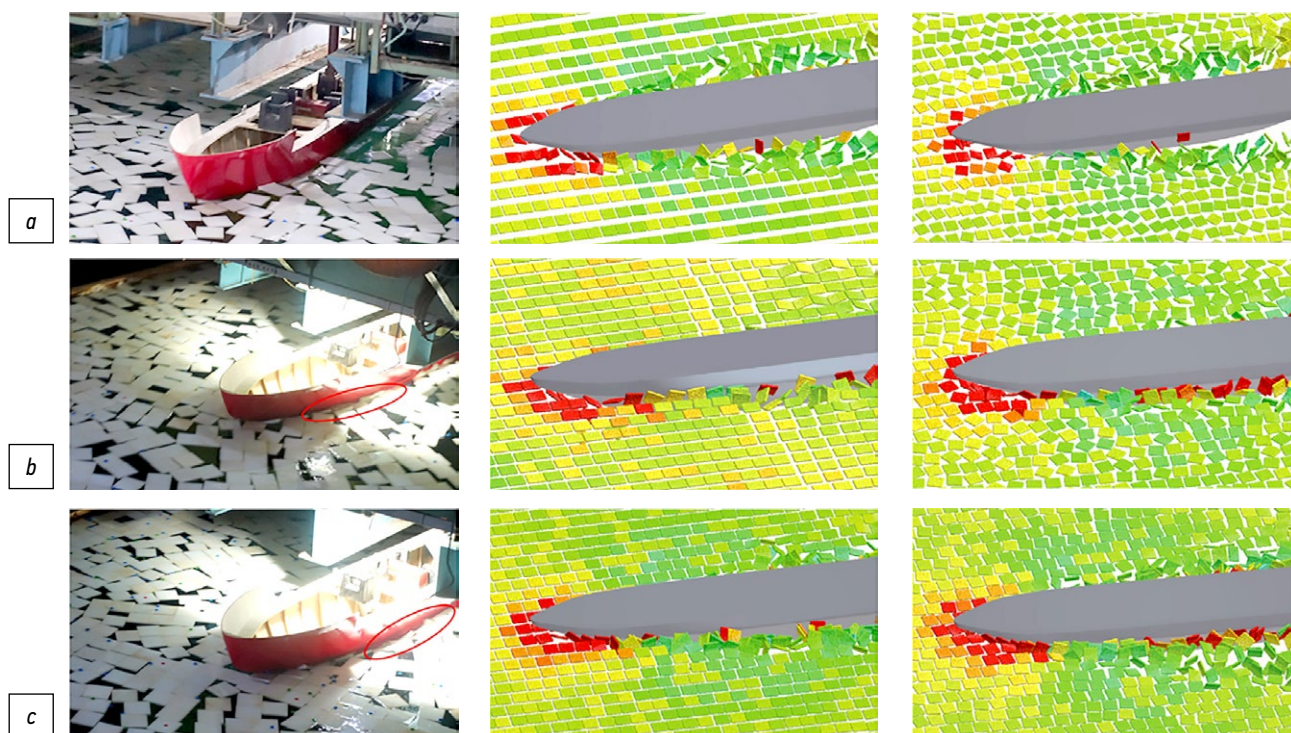
**Рис. 5.** Численная модель корабля в сравнении с модельным экспериментом при различной сплоченности льда [9]: *a* — 60%, *b* — 80%, *c* — 90%.  
**Fig. 5.** Numerical ship model compared to a model experiment with different ice concentrations [9]: *a*, 60%; *b*, 80%; *c*, 90%.



**Рис. 6.** Сравнение распределения льда при численном моделировании с соответствующим модельным экспериментом [31].  
**Fig. 6.** Comparison of ice distribution in numerical models with the corresponding model experiments [31].

В [35] строится вычислительная модель для имитации движения судна в предварительно проложенном ледоколом ледовом канале. Модель применяет вычислительную гидродинамику для расчета обтекания движущегося судна в сочетании с усовершенствованным методом дискретных элементов для моделирования предварительно разрушенных кусков льда. Эксперименты в масштабе модели также были проведены в ледовом бассейне Aalto Ice

Tank для проверки моделирования, которое показывает, что вычислительная модель может дать разумную оценку сопротивления предварительно разрушенного льда и движения вокруг судна. При валидации была проанализирована зависимость ледового сопротивления от скорости судна. Моделирование позволяет осуществлять подводный мониторинг движения льда, указывая на то, что скорость судна зависит от массы льда, погруженного под него



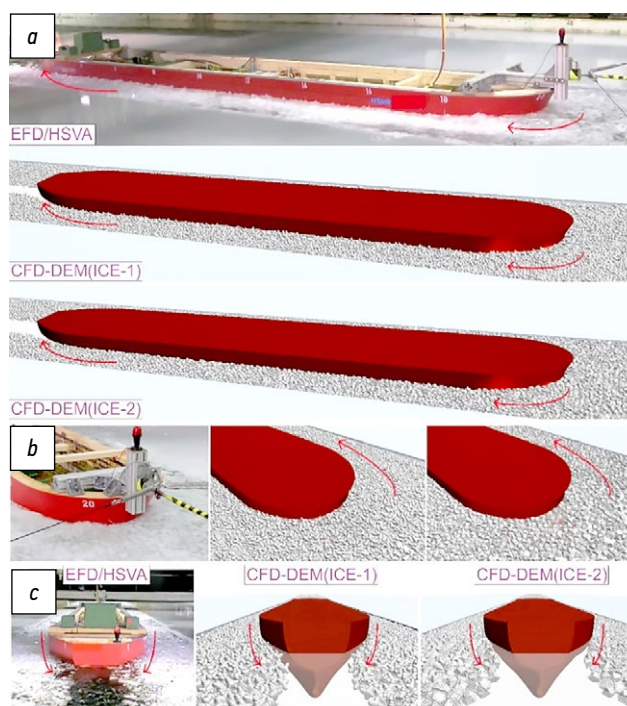
**Рис. 7.** Взаимодействие модели численного и модельного экспериментов с ледовым полем различной концентрации: в центре – фиксированное распределение, справа — случайное распределение [33]: *a* — 60%, *b* — 70%, *c* — 80%.

**Fig. 7.** Interaction of the numerical and model experiments with ice fields of different concentrations: fixed distribution (center) and random distribution (right) [33]: *a*, 60%; *b*, 70%, *c*, 80%.

и от вызванного корпусом смещения битого льда. Выявленные зависимости являются более сложными, чем широко используемое предположение о том, что ледовое сопротивление линейно изменяется со скоростью судна во всех случаях, что обеспечивает более глубокое понимание ледового сопротивления.

INTERA Technologies [36, 37] разработана программа маневрирования корабля во льдах, основанная на методе дискретных элементов. Программа основана на программе Лаборатории маневрирования судов (SML) и программе численного моделирования дискретных элементов (DECICE). SML — это внутренний код, разработанный Oceanic Consulting Corporation для моделирования маневрирования судна в открытой воде. В документе представлен краткий обзор использованных математических методов, а также результаты некоторых тематических исследований для судов EXM004, PSM004 и Esso Osaka Tanker. Прогнозы включают поворотный круг и зигзагообразные маневры. Представлены сравнения смоделированных результатов между случаями со льдом и без него.

Помимо численного учета потока при исследовании ледопроеходимости существует и эмпирический, используемый совместно с DEM. Результаты [38] показывают, что ледовое сопротивление мало изменяется при изменении размера льдины, что противоречит выводам [28]. Различные формы льдин рассмотрены в [39], сферические частицы — [40]. Моделирование ледяной крошки с помощью тетраэдрических и неправильных многогранных



**Рис. 8.** Сравнение численного и модельного экспериментов [41].

**Fig. 8.** Comparison of numerical and model experiments [41].

частиц, которые представляют собой составные частицы, состоящие из нескольких основных сферических частиц [41] (рис. 8). По результатам наблюдается соответствие

данных моделирования модельному испытанию по среднему сопротивлению.

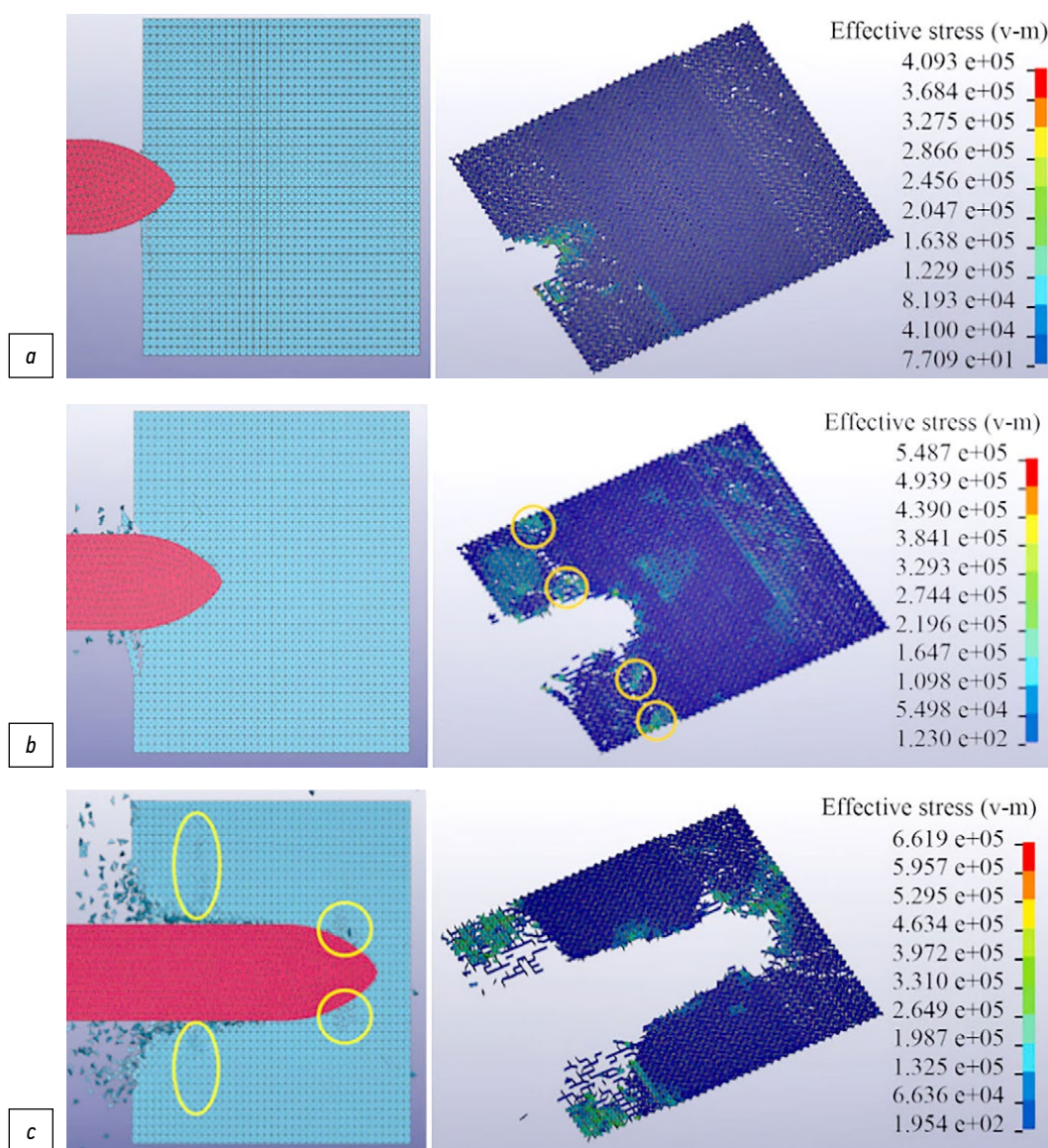
## МЕТОД КОГЕЗИОННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ (СЕМ)

Метод применяется для моделирования процессов разрушения льда в зоне его взаимодействия с корпусом судна, особенно в ситуациях, связанных с растрескиванием и разрушением льда, где возникает сложное напряжённо-деформированное состояние (рис. 9). СЕМ использует когезионные модели, которые определяют зависимость между напряжением и относительным смещением в поверхности контакта. Когда напряжение превышает критическое значение, поверхность контакта постепенно разрушается, имитируя образование и расширение трещин.

Часто при моделировании взаимодействия судна со льдом СЕМ применяется совместно с FEM. Основным принципом заключается в том, что в зоне перед фронтом трещины создается виртуальная когезионная область, описывающая соотношение напряжений и смещений до полного разрушения льда. По мере увеличения напряжения, напряжение в когезионном элементе уменьшается, пока лед не разрушится, имитируя расширение ледяной трещины. Основное ограничение метода — зависимость траектории распространения трещин от дискретизации сетки.

## ДРУГИЕ МЕТОДЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ

Sawamura в [43] предложил собственную модель расчета взаимодействия судна со льдом, которая основана на обнаружении области контакта по кругу с учетом



**Рис. 9.** Моделирование ледостава судна с помощью МКЭ [42].  
**Fig. 9.** Modeling of ship ice formation using FEM [42].

растрескивания и изгиба льда, при этом предполагается постоянное давление раздавливания. Моделирование проводится в двумерной постановке.

В работе [44] использована перидинамическая теория, примененная к трещинам и повреждениям при взаимодействии корабля со льдом. Изучены несколько случаев концентрации льда, размеров ледяных обломков и скорости движения судна. В результате такого подхода можно проследить за динамическим образованием трещин, накоплением битого льда. Возможность применения подобного подхода подтверждается согласованием результатов моделирования и эксперимента по ледовой нагрузке.

Метод гидродинамики сглаженных частиц (SPH) с учетом критерия предела текучести Друкера-Прагера рассмотрен в [45]. Моделируется взаимодействие наклонной конструкции и судна со сплошным льдом. Авторами отмечается надежность и точные результаты данного подхода, показано, что модель SPH может удовлетворительно прогнозировать ледопробитость судов. Полученные результаты сравниваются с экспериментальными для модели ледокола Араон в масштабе 1:20. Другой пример SPH метода представлен в [46].

В статье [47] исследуется использование моделирования GPU-Event-Mechanics (GEM) для оценки ледовых нагрузок, действующих на морское сооружение, работающего в условиях пакового льда. Область моделирования включает большое количество дискретных льдин в виде определяемого пользователем ледяного поля. Могут быть реализованы параметры окружающей среды (течение, ветер) для имитации более реалистичных условий. Для анализа ледовых нагрузок моделируются различные ледовые покровы, толщина льда и т.д. Результирующая ледовая нагрузка оценивается качественно и сравнивается с опубликованными натурными исследованиями.

На основе метода когезионных элементов (СЕМ) с помощью метода FEM в [48] создается модель столкновения конуса со льдом, корректность модели проверяется путем сравнения модельных и экспериментальных данных (рисунк 10). В указанной работе производится анализ влияния упрощений при моделировании потока на ледовое сопротивление.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

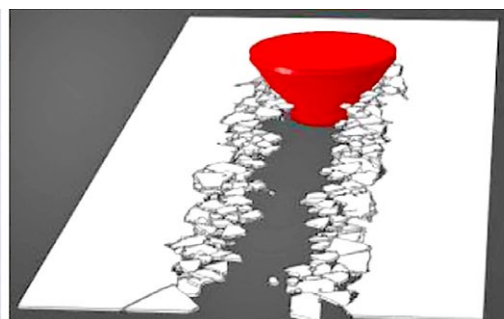
Исходя из анализа литературы, посвященной численному моделированию движения судна во льдах и определению сопротивления движению, можно сделать выводы о том, что наиболее часто применяемый метод — метод дискретных частиц. При таком подходе используются различные формы льдин, но наилучшее согласование с модельными экспериментами наблюдаются у частиц сферической формы.

Сложность определения параметров, необходимых для построения модели и калибровки параметров: когезионная прочность, трещиностойкость и прочность льда (изгибная и на смятие). Применимость модели во многих зависит от точности этих параметров. Получение этих параметров опирается на экспериментальные данные, но из-за неоднородности и сложности льда в природных условиях механические свойства различных слоев льда могут значительно отличаться, что затрудняет экспериментальное определение параметров модели и калибровочных кривых, а также требует тонкой настройки зависимости напряжения от деформации для правильного описания процесса разрушения.

В большинстве моделей не учитываются упругие свойства льда, их учет может быть произведен за счет использования слипшихся частиц DEM. Во многих работах рассматривает подход упрощенного учета гидродинамической силы, однако CFD учет потока приводит к лучшему согласованию с экспериментом. В табл. 1 представлены работы, посвященные DEM-CFD методу моделирования, их результаты и программы, в которых был произведен расчет. Исходя из табл. 1 можно отметить, что наиболее часто реализация моделирования движения судна во льдах осуществляется в программах STAR-CCM+, LC-DYNA и ABAQUS. Все программы представляют собой коммерческие среды для решения задач механики жидкости, газа и деформируемого твердого тела, динамики частиц, динамики течений.

## ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ИНФОРМАЦИЯ

**Вклад авторов.** М.А. Бережная — поиск публикаций по теме статьи, написание текста рукописи; Н.В. Тряскин — поиск публикаций по теме



**Рис. 10.** Сравнение физического и математического экспериментов [48].

**Fig. 10.** Comparison of physical and mathematical experiments [48].

**Таблица 1.** Методы численного моделирования движения судна во льдах**Table 1.** Numerical modeling methods of ship movement in ice

Работа	Особенности моделирования	Программа	Результат
[28]	Лед — дискообразные частицы, распределенные случайным образом.	STAR-CCM+	Сопротивление отличается менее чем на 10% от эксперимента с синтетическим льдом.
[29]	Лед — ансамбль частиц, взвешенных на поверхности воды. Потенциальное (движение льда вверх по течению) и вихревое (перенос льда в следе) течение. Внешние силы не моделируются.	Нет информации	Модель не проходит валидацию.
[30]	Лед моделируется многогранниками.	STAR-CCM+	Модель не проходит валидацию.
[9]	Применение формулировки Эйлера-Лагранжа.	ABAQUS	Качественное и количественное согласование с экспериментом.
[20]	Плавающие льдины со случайным распределением размера, толщины и формы. Применение формулировки Эйлера-Лагранжа.	ABAQUS	Как численные, так и экспериментальные результаты хорошо согласовывались с точки зрения средней ледовой нагрузки, за исключением низких скоростей при сплошности 80%.
[31]	Рассмотрены различные формы льдин (тетраэдральная, неправильная многогранная, семигранная, кубовидная, блин). Три модели контакта со льдом (Hertz-Mindlin, Linear Spring, Walton Braun)	STAR-CCM+	Максимальная погрешность общего сопротивления находится в пределах 5,5%.
[32]	Лед моделируется как упругий, форма — многогранники.	LC-DYNA	Процентное отклонение математического эксперимента от физического не превышает 15%.
[33]	Оценка случайного и фиксированного распределения льда. Модель контакта со льдом — Hertz-Mindlin.	Нет информации	У случайного распределения точность выше.
[34]	Изучено сопротивление судна, идущего по полям битого льда в масштабе модели с учетом силы трения битого льда, а также сопротивления вод и гидродинамической силы битого льда.	STAR-CCM+	Ошибка между результатами численного моделирования и результатами испытаний составляет менее 5%.
[35]	Имитация движения льда в предварительно выпиленном канале.	STAR-CCM+	Вычислительная модель может дать разумную оценку сопротивления предварительно распиленного льда и движения вокруг корабля.
[24]	Одностороннее сопряжение метода вычислительной гидродинамики и дискретных элементов. Модель контакта со льдом — Hertz-Mindlin.	STAR-CCM+	Наблюдается процесс распространения радиальных и кольцевых ледяных трещин.

статьи, редактирование текста рукописи; С. Юй — поиск публикаций по теме статьи, систематизация результатов исследования; Б. Чжао — поиск публикаций по теме статьи, создание изображений. 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.

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

## ADDITIONAL INFORMATION

**Author contributions:** Mariya A. Berezhnaya: investigation, writing—original draft; N.V. Tryaskin: investigation, writing—review & editing; S. Yu: investigation, formal analysis; B. Zhao: investigation, visualization. All the authors approved the version of the manuscript to be published and agree to be accountable for all aspects of the work, ensuring that issues related to the accuracy or integrity of any part of the work are appropriately investigated and resolved.

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

**Disclosure of interests:** The authors have no relationships, activities, or interests for the last three years related to for-profit or not-for-profit third parties whose interests may be affected by the content of the article.

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

**Provenance and peer review:** This paper was submitted unsolicited and reviewed following the standard procedure. The peer review process involved one reviewer, a member of the editorial board, and the in-house scientific editor.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Islam M., Mills J., Gash R., Pearson W. A literature survey of broken ice-structure interaction modelling methods for ships and offshore platforms // *Ocean Engineering*. 2021. Vol. 221. doi: 10.1016/j.oceaneng.2020.108527 EDN: YEYYSK
2. Chernov A.V. Measuring total ship bending with a help of tensometry during the full-scale in situ ice impact study of ice-breaker 'kapitan nikolaev'. In: *Proceedings of the 20th International Conference on Port and Ocean Engineering under Arctic Conditions*, Lulea, Sweden, 9-12 June 2009. Lulea, 2009. POAC09-027. EDN: UELLKN
3. Kujala P., Arughadhoss S. Statistical analysis of ice crushing pressures on a ship's hull during hull-ice interaction // *Cold Reg. Sci. Technol.* 2012. Vol. 70. P. 1–11. doi: 10.1016/j.coldregions.2011.09.009
4. Islam M., Sayeed T., Wang J., Millan J. On the Effect of Managed Ice Field Parameters on Global Surge Force of a DP Vessel. In: *Proceedings of the Twenty-seventh (2017) International Ocean and Polar Engineering Conference*. San Francisco, CA, USA, June 25–30, 2017. San Francisco, 2017.
5. Heinonen T.J., Immonen V.E. Full-scale Measurements and Observations of Icebreaking Notch Towing Operations. In: *Proceedings of the Twenty-seventh (2017) International Ocean and Polar Engineering Conference*. San Francisco, CA, USA, June 25–30, 2017.
6. Myland D., Reimer N., Hinse P. Model Tests for Development of an Ice Route Optimization Tool. In: *Proceedings of the Twenty-third (2013) International Offshore and Polar Engineering*. Anchorage, Alaska, USA, June 30–July 5, 2013. Anchorage, 2013.
7. Huang Y., Huang S.Y., Sun J.Q. Experiments on navigating resistance of an icebreaker in snow covered level ice // *Cold Reg. Sci. Technol.* 2018. Vol. 152. P. 1–14. doi: 10.1016/j.coldregions.2018.04.007
8. Huang Y., Li W., Wang Y., Wu B. Experiments on the resistance of a large transport vessel navigating in the arctic region in pack ice conditions // *J. Mar. Sci. Appl.* 2016. Vol. 15. P. 269–274. doi: 10.1007/s11804-016-1362-x EDN: XUMTFP
9. Kim M.C., Lee S.K., Lee W.J. Numerical and experimental investigation of the resistance performance of an icebreaking cargo vessel in pack ice conditions // *Int. J. Nav. Archit. Ocean Eng.* 2014. Vol. 5. P. 116–131. doi: 10.2478/IJNAOE-2013-0121
10. Birajdar P.R., Taylor R.S., Hossain R.B. Analysis of the Effect of Structural Compliance during Medium-Scale Laboratory Tests on Ice Crushing Dynamics. In: *Proceedings of the Twenty-seventh (2017) International Ocean and Polar Engineering Conference* San Francisco, CA, USA, June 25–30, 2017. San Francisco, 2017. doi: 10.4043/27482-MS
11. Pogorelova A.V., Zemlyak V.L., Kozin V.M. Moving of a submarine under an ice cover in fluid of finite depth // *J. Hydrodyn.* 2019. Vol. 31. P. 562–569. doi: 10.1007/s42241-018-0143-1 EDN: KBETGT
12. Li Z.F., Wu G.X., Ren K. Wave diraction by multiple arbitrary shaped cracks in an infinitely extended ice sheet of finite water depth // *J. Fluid Mech.* 2020. Vol. 893. doi: 10.1017/jfm.2020.238 EDN: SQXVJC
13. Sturova I.V. Radiation of waves by a cylinder submerged in water with ice floe or polynya // *J. Fluid Mech.* 2015. Vol. 784. P. 373–395. doi: 10.1017/jfm.2015.582 EDN: WRDELRL
14. Derradji-Aouat A., Sinha N.K., Evgin E. Mathematical modelling of monotonic and cyclic behaviour of fresh water columnar grained S-2 ice // *Cold regions science and technology*. 2000. Vol. 31, N. 1. P. 59–81. doi: 10.1016/S0165-232X(00)00005-7
15. Afrizal E., Koto J., Wahid M.A. Effect of Bulbous Bow on Ice Resistance of Ice Ship // *Journal of Ocean, Mechanical and Aerospace-science and engineering*. 2018. Vol. 60, N. 1. P. 7–17. doi: 10.36842/jomase.v60i1.74
16. Koto J., Afrizal E., Wahid M.A. Buckling and Deflection of Ice Sheet Caused by Ship // *Journal of Ocean, Mechanical and Aerospace-science and engineering*. 2019. Vol. 62, N. 1. P. 5–11. doi: 10.36842/jomase.v62i1.104
17. Chen Z., He Y., Gu Y., et al. A novel method for numerical simulation of the interaction between level ice and marine structures // *Journal of Marine Science and Technology*. 2021. P. 1–14. doi: 10.1007/s00773-021-00799-w EDN: QEHVRR
18. Kim M.C., Lee W.-J., Shin Y.J. Comparative study on the resistance performance of an icebreaking cargo vessel according to the variation of waterline angles in pack ice conditions // *Int. J. Nav. Archit. Ocean Eng.* 2014. Vol. 6. P. 876–893. doi: 10.2478/IJNAOE-2013-0219
19. Chen R., Li H., Feng Ya., Wang X. Study on the structural response of ship shoulder in narrow ice channel using SPH-FEM. In: *Proceedings of the Thirty-second International Ocean and Polar Engineering Conference*. Shanghai, China, June 5–10, 2022. Shanghai, 2022. P. 1380–1385.
20. Kim J.H., Kim Y., Kim H.S., Jeong S.Y. Numerical simulation of ice impacts on ship hulls in broken ice fields // *Ocean Engineering*. 2019. Vol. 180. P. 162–174. doi: 10.1016/j.oceaneng.2019.03.043 EDN: JEMIPV
21. Cundall P.A., Strack O.D. A discrete numerical model for granular assemblies // *Geotechnique*. 1979. Vol. 29, N. 1. P. 47–65. doi: 10.1680/geot.1979.29.1.47
22. Cundall P.A. A computer model for simulating progressive, large-scale movement in blocky rock system. In: *Proceedings of the International Symposium on Rock Mechanics*. Nancy, 1971. Vol. 2. P. 129–136.
23. Zhong W., Yu A., Liu X., et al. DEM/CFD-DEM modelling of non-spherical particulate systems: theoretical developments and applications // *Powder technology*. 2016. Vol. 302. P. 108–152. doi: 10.1016/j.powtec.2016.07.010 EDN: WTBTDP
24. Ni B.-Yu., Chen Z.-W., Zhong K., et al. Numerical Simulation of a Polar Ship Moving in Level Ice Based on a One-Way Coupling Method // *Journal of Marine Science and Engineering*. 2020. Vol. 8. doi: 10.3390/jmse8090692 EDN: QPGKSG
25. Jou O., A Celigueta M.A., Latorre S., et al. bonded discrete element method for modeling ship-ice interactions in broken and unbroken sea ice fields // *Comput. Part. Mech.* 2019. Vol. 6. P. 739–765. doi: 10.1007/s40571-019-00259-8 EDN: HWAUNJ
26. Liu L., Ji S. Bond and fracture model in dilated polyhedral DEM and its application to simulate breakage of brittle materials // *Granul. Matter*. 2019. N. 21. doi: 10.1007/s10035-019-0896-4 EDN: XIOFFF
27. Yang B., Sun Z., Zhang G., et al. Numerical estimation of ship resistance in broken ice and investigation on the effect of floe geometry // *Mar. Struct.* 2021. Vol. 75. doi: 10.1016/j.marstruc.2020.102867 EDN: JOYJEN
28. Huang L., Tuhkuri J., Igrec B., et al. Ship resistance when operating in floating ice floes: A combined CFD&DEM approach // *Mar. Struct.* 2020. Vol. 74. doi: 10.1016/j.marstruc.2020.102817 EDN: HAOXNO
29. Tsarau A., Loset S. Modelling the hydrodynamic effects associated with station-keeping in broken ice // *Cold Regions Science and Technology*. 2015. Vol. 118. P. 76–90. doi: 10.1016/j.coldregions.2015.06.019
30. Mucha P. Fully-coupled CFD-DEM for simulations of ships advancing through brash ice. In: *Proceedings of the SNAME Maritime Convention*, Tacoma, DC, USA, 30 October–1 November 2019. Tacoma, 2019. Vol. 1. EDN: AMGNVE
31. Zhang J., Zhang Y., Shang Y., et al. CFD-DEM based full-scale ship-ice interaction research under FSICR ice condition in restricted brash ice channel // *Cold Regions Science and Technology*. 2022. Vol. 194. doi: 10.1016/j.coldregions.2021.103454 EDN: MCMYNG
32. Wang C., Hu X., Tian T., et al. Numerical simulation of ice loads on a ship in broken ice fields using an elastic ice model // *International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering*. 2020. Vol. 12. P. 414–427. doi: 10.1016/j.ijnaoe.2020.03.001 EDN: SRPWYG
33. Guo W., Zhao Q., Tian Y., Zhang W. Research on total resistance of ice-going ship for different floe ice distributions based on virtual mass method // *International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering*. 2020. Vol. 12. P. 957–966. doi: 10.1016/j.ijnaoe.2020.11.006 EDN: JILOTJ
34. Xie C., Zhou L., Wu T., et al. Resistance Performance of a Ship in Model-Scaled Brash Ice Fields Using CFD and DEM Coupling Model // *Front. Energy Res.* 2022. Vol. 10. doi: 10.3389/fenrg.2022.895948 EDN: VJJUFB
35. Huang L., Li F., Li M., et al. An investigation on the speed dependence of ice resistance using an advanced CFD+DEM approach based on pre-sawn ice tests // *Ocean Engineering*. 2022. Vol. 264. doi: 10.1016/j.oceaneng.2022.112530 EDN: ZSGMCF
36. Zhan D., Agar D., He M., et al. Molyneux. Numerical simulation of ship maneuvering in pack ice. In: *Proceedings of the ASME 2010 29th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering*. OMAE2010. June 6–11, 2010, Shanghai, China. Shanghai, 2010. doi: 10.1115/OMAE2010-21109
37. Zhan D., Molyneux D. 3-dimensional numerical simulation of ship motion in pack ice. In: *Proceedings of the asme 2012 31st International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering*. OMAE2012. July 1–6, 2012, Rio de Janeiro, Brazil. Rio de Janeiro, 2012. doi: 10.1115/OMAE2012-83105



38. Ji S., Li Z., Li C., Shang J. Discrete element modeling of ice loads on ship and offshore structures // *Acta Oceanol.* 2013. Vol. 188. doi: 10.1007/978-981-10-1926-5\_6
39. Konno A. Resistance evaluation of ship navigation in brash ice channels with physically based modeling. In: *Proceedings of the International Conference on Port and Ocean Engineering under Arctic Conditions, Lulea, Sweden, 9-12 June 2009.* Lulea, 2009. Vol. 2. P. 855–863.
40. Prasanna M., Hissette Q. Discrete Element Simulation of Ships Navigating Through Brash Ice Channels. In: *Proceedings of the OTC Arctic Technology Conference, Houston, TX, USA, 5-7 November 2018.* Houston, 2018. doi: 10.4043/29163-MS
41. Luo W., Jiang D., Wu T., et al. Numerical simulation of an ice-strengthened bulk carrier in brash ice channel // *Ocean Eng.* 2020. Vol. 196. doi: 10.1016/j.oceaneng.2019.106830 EDN: GIFSWD
42. Ni B., Wang Y., Xu Y., Chen W. Numerical Simulation of Ship Collision with Rafted Ice Based on Cohesive Element Method // *Journal of Marine Science and Application.* 2024. Vol. 23, N. 1. P. 127–136. doi: 10.1007/s11804-024-00418-1
43. Sawamura J. 2D numerical modeling of icebreaker advancing in ice-covered water // *Int. J. Nav. Archit. Ocean Eng.* 2018. Vol. 10. P. 385–392. doi: 10.1016/j.ijnaoe.2018.02.005
44. Liu R.W., Xue Y.Z., Lu X.K., Cheng W.X. Simulation of ship navigation in ice rubble based on peridynamics // *Ocean Eng.* 2018. Vol. 148. P. 286–298. doi: 10.1016/j.oceaneng.2017.11.034
45. Zhang N., Yan S., Zheng X., Ma Q. Numerical study on the dynamic interaction between ice and a vertical compliant structure by Smoothed Particle Hydrodynamics. In: *Proceedings of the Thirty-first (2021) International Ocean and Polar Engineering Conference.* Rhodes, Greece, June 20–25, 2021. Rhodes, 2021. EDN: GDGDHX
46. Zhang N., Zheng X., Ma Q., Hu Z. A numerical study on ice failure process and ice-ship interactions by Smoothed Particle Hydrodynamics // *International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering.* 2019. Vol. 11. doi: 10.1016/j.ijnaoe.2019.02.008
47. Kim H., Daley C. Evaluation of Ice Loads on Offshore Structure Using GPU-Event-Mechanics. In: *Proceedings of the Twenty-ninth (2019) International Ocean and Polar Engineering Conference.* Honolulu, Hawaii, USA, June 16–21, 2019. Honolulu, 2019.
48. Truong D.D., Jang B.-S. Numerical Simulation of Failure of Sea Level-ice based on the Damage-based Erosion Model. In: *Proceedings of the Thirty-first (2021) International Ocean and Polar Engineering Conference.* Rhodes, Greece, June 20 – 25, 2021. Rhodes, 2021.

## REFERENCES

1. Islam M, Mills J, Gash R, Pearson W. A literature survey of broken ice-structure interaction modelling methods for ships and offshore platforms. *Ocean Engineering.* 2021;221. doi: 10.1016/j.oceaneng.2020.108527 EDN: YEYYSK
2. Chernov AV. Measuring total ship bending with a help of tensometry during the full-scale in situ ice impact study of ice-breaker 'kapitan nikolaev'. In: *Proceedings of the 20th International Conference on Port and Ocean Engineering under Arctic Conditions, Lulea, Sweden, 9-12 June 2009.* Lulea; 2009:POAC09-027. EDN: UELLKN
3. Kujala P, Arughadhoss S. Statistical analysis of ice crushing pressures on a ship's hull during hull-ice interaction. *Cold Reg. Sci. Technol.* 2012;70:1–11. doi: 10.1016/j.coldregions.2011.09.009
4. Islam M, Sayeed T, Wang J, Millan J. On the Effect of Managed Ice Field Parameters on Global Surge Force of a DP Vessel. In: *Proceedings of the Twenty-seventh (2017) International Ocean and Polar Engineering Conference.* San Francisco, CA, USA, June 25–30, 2017. San Francisco; 2017.
5. Heinoen TJ, Immonen VE. Full-scale Measurements and Observations of Icebreaking Notch Towing Operations. In: *Proceedings of the Twenty-seventh (2017) International Ocean and Polar Engineering Conference.* San Francisco, CA, USA, June 25–30, 2017. San Francisco; 2017.
6. Myland D, Reimer N, Hinse P. Model Tests for Development of an Ice Route Optimization Tool. In: *Proceedings of the Twenty-third (2013) International Offshore and Polar Engineering Conference.* Anchorage, Alaska, USA, June 30–July 5, 2013. Anchorage; 2013.
7. Huang Y, Huang SY, Sun JQ. Experiments on navigating resistance of an icebreaker in snow covered level ice. *Cold Reg. Sci. Technol.* 2018;152:1–14. doi: 10.1016/j.coldregions.2018.04.007
8. Huang Y, Li W, Wang Y, Wu B. Experiments on the resistance of a large transport vessel navigating in the arctic region in pack ice conditions. *J. Mar. Sci. Appl.* 2016;15:269–274. doi: 10.1007/s11804-016-1362-x EDN: XUMTFP
9. Kim MC, Lee SK, Lee WJ. Numerical and experimental investigation of the resistance performance of an icebreaking cargo vessel in pack ice conditions. *Int. J. Nav. Archit. Ocean Eng.* 2014;5:116–131. doi: 10.2478/IJNAOE-2013-0121
10. Birajdar PR, Taylor RS, Hossain RB. Analysis of the Effect of Structural Compliance during Medium-Scale Laboratory Tests on Ice Crushing Dynamics. In: *Proceedings of the Twenty-seventh (2017) International Ocean and Polar Engineering Conference San Francisco, CA, USA, June 25-30, 2017.* San Francisco; 2017. doi: 10.4043/27482-MS
11. Pogorelova AV, Zemlyak VL, Kozin VM. Moving of a submarine under an ice cover in fluid of finite depth. *J. Hydrodyn.* 2019;31:562–569. doi: 10.1007/s42241-018-0143-1 EDN: KBETGT
12. Li ZF, Wu GX, Ren K. Wave direction by multiple arbitrary shaped cracks in an infinitely extended ice sheet of finite water depth. *J. Fluid Mech.* 2020;893. doi: 10.1017/jfm.2020.238 EDN: SQXVJC
13. Sturova IV. Radiation of waves by a cylinder submerged in water with ice floe or polynya. *J. Fluid Mech.* 2015;784:373–395. doi: 10.1017/jfm.2015.582 EDN: WRDELRL
14. Derradji-Aouat A, Sinha NK, Evgin E. Mathematical modelling of monotonic and cyclic behaviour of fresh water columnar grained S-2 ice. *Cold regions science and technology.* 2000;31(1):59–81. doi: 10.1016/S0165-232X(00)00005-7
15. Afrizal E, Koto J, Wahid MA. Effect of Bulbous Bow on Ice Resistance of Ice Ship. *Journal of Ocean, Mechanical and Aerospace-science and engineering.* 2018;60(1):7–17. doi: 10.36842/jomase.v60i1.74
16. Koto J, Afrizal E, Wahid MA. Buckling and Deflection of Ice Sheet Caused by Ship. *Journal of Ocean, Mechanical and Aerospace-science and engineering.* 2019;62(1):5–11. doi: 10.36842/jomase.v62i1.104
17. Chen Z, He Y, Gu Y, et al. A novel method for numerical simulation of the interaction between level ice and marine structures. *Journal of Marine Science and Technology.* 2021;1–14. doi: 10.1007/s00773-021-00799-w EDN: QEHVRR
18. Kim MC, Lee W-J, Shin YJ. Comparative study on the resistance performance of an icebreaking cargo vessel according to the variation of waterline angles in pack ice conditions. *Int. J. Nav. Archit. Ocean Eng.* 2014;6:876–893. doi: 10.2478/IJNAOE-2013-0219
19. Chen R, Li H, Feng Ya, Wang X. Study on the structural response of ship shoulder in narrow ice channel using SPH-FEM. In: *Proceedings of the Thirty-second International Ocean and Polar Engineering Conference.* Shanghai, China, June 5–10, 2022. Shanghai; 2022:1380–1385.
20. Kim JH, Kim Y, Kim HS, Jeong SY. Numerical simulation of ice impacts on ship hulls in broken ice fields. *Ocean Engineering.* 2019;180:162–174. doi: 10.1016/j.oceaneng.2019.03.043 EDN: JEMIPV
21. Cundall PA, Strack OD. A discrete numerical model for granular assemblies. *Geotechnique.* 1979;29(1):47–65. doi: 10.1680/geot.1979.29.1.47
22. Cundall PA. A computer model for simulating progressive, large-scale movement in blocky rock system. In: *Proceedings of the International Symposium on Rock Mechanics.* Nancy; 1971;2:129–136.
23. Zhong W, Yu A, Liu X, et al. DEM/CFD-DEM modelling of non-spherical particulate systems: theoretical developments and applications. *Powder technology.* 2016;302:108–152. doi: 10.1016/j.powtec.2016.07.010 EDN: WTBTDTP
24. Ni B-Yu, Chen Z-W, Zhong K, et al. Numerical Simulation of a Polar Ship Moving in Level Ice Based on a One-Way Coupling Method. *Journal of Marine Science and Engineering.* 2020;8. doi: 10.3390/jmse8090692 EDN: QPGKSG
25. Jou O, A Celigueta MA, Latorre S, et al. bonded discrete element method for modeling ship-ice interactions in broken and unbroken sea ice fields. *Comput. Part. Mech.* 2019;6:739–765. doi: 10.1007/s40571-019-00259-8 EDN: HWAUNJ
26. Liu L, Ji S. Bond and fracture model in dilated polyhedral DEM and its application to simulate breakage of brittle materials. *Granul. Matter.* 2019;21. doi: 10.1007/s10035-019-0896-4 EDN: XIOFFF

27. Yang B, Sun Z, Zhang G, et al. Numerical estimation of ship resistance in broken ice and investigation on the effect of floe geometry. *Mar. Struct.* 2021;75. doi: 10.1016/j.marstruc.2020.102867 EDN: JOYJEN
28. Huang L, Tuhkuri J, Igrac B, et al. Ship resistance when operating in floating ice floes: A combined CFD&DEM approach. *Mar. Struct.* 2020;74. doi: 10.1016/j.marstruc.2020.102817 EDN: HAOXNO
29. Tsarau A, Loset S. Modelling the hydrodynamic effects associated with station-keeping in broken ice. *Cold Regions Science and Technology.* 2015;118:76–90. doi: 10.1016/j.coldregions.2015.06.019
30. Mucha P. Fully-coupled CFD-DEM for simulations of ships advancing through brash ice. In: *Proceedings of the SNAME Maritime Convention, Tacoma, DC, USA, 30 October–1 November 2019.* Tacoma; 2019;1. EDN: AMGNVE
31. Zhang J, Zhang Y, Shang Y, et al. CFD-DEM based full-scale ship-ice interaction research under FSICR ice condition in restricted brash ice channel. *Cold Regions Science and Technology.* 2022;194. doi: 10.1016/j.coldregions.2021.103454 EDN: MCMYNQ
32. Wang C, Hu X, Tian T, et al. Numerical simulation of ice loads on a ship in broken ice fields using an elastic ice model. *International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering.* 2020;12:414–427. doi: 10.1016/j.ijnaoe.2020.03.001 EDN: SRPWYG
33. Guo W, Zhao Q, Tian Y, Zhang W. Research on total resistance of ice-going ship for different floe ice distributions based on virtual mass method. *International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering.* 2020;12:957–966. doi: 10.1016/j.ijnaoe.2020.11.006 EDN: JILOTJ
34. Xie C, Zhou L, Wu T, et al. Resistance Performance of a Ship in Model-Scaled Brash Ice Fields Using CFD and DEM Coupling Model. *Front. Energy Res.* 2022;10. doi: 10.3389/fenrg.2022.895948 EDN: VJJUFB
35. Huang L, Li F, Li M, et al. An investigation on the speed dependence of ice resistance using an advanced CFD+DEM approach based on pre-sawn ice tests. *Ocean Engineering.* 2022;264. doi: 10.1016/j.oceaneng.2022.112530 EDN: ZSGMCF
36. Zhan D, Agar H, De M, et al. Molyneux. Numerical simulation of ship maneuvering in pack ice. In: *Proceedings of the ASME 2010 29th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering. OMAE2010. June 6–11, 2010, Shanghai, China.* Shanghai; 2010. doi: 10.1115/OMAE2010-21109
37. Zhan D, Molyneux D. 3-dimensional numerical simulation of ship motion in pack ice. In: *Proceedings of the ASME 2012 31st International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering. OMAE2012. July 1–6, 2012, Rio de Janeiro, Brazil.* Rio de Janeiro; 2012. doi: 10.1115/OMAE2012-83105
38. Ji S, Li Z, Li C, Shang J. Discrete element modeling of ice loads on ship and offshore structures. *Acta Oceanol.* 2013;188. doi: 10.1007/978-981-10-1926-5\_6
39. Konno A. Resistance evaluation of ship navigation in brash ice channels with physically based modeling. In: *Proceedings of the International Conference on Port and Ocean Engineering under Arctic Conditions, Lulea, Sweden, 9–12 June 2009.* Lulea; 2009;2:855–863.
40. Prasanna M, Hissette Q. Discrete Element Simulation of Ships Navigating Through Brash Ice Channels. In: *Proceedings of the OTC Arctic Technology Conference, Houston, TX, USA, 5–7 November 2018.* Houston; 2018. doi: 10.4043/29163-MS
41. Luo W, Jiang D, Wu T, et al. Numerical simulation of an ice-strengthened bulk carrier in brash ice channel. *Ocean Eng.* 2020;196. doi: 10.1016/j.oceaneng.2019.106830 EDN: GIFSWD
42. Ni B, Wang Y, Xu Y, Chen W. Numerical Simulation of Ship Collision with Rafted Ice Based on Cohesive Element Method. *Journal of Marine Science and Application.* 2024;23(1):127–136. doi: 10.1007/s11804-024-00418-1
43. Sawamura J. 2D numerical modeling of icebreaker advancing in ice-covered water. *Int. J. Nav. Archit. Ocean Eng.* 2018;10:385–392. doi: 10.1016/j.ijnaoe.2018.02.005
44. Liu RW, Xue YZ, Lu XK, Cheng WX. Simulation of ship navigation in ice rubble based on peridynamics. *Ocean Eng.* 2018;148:286–298. doi: 10.1016/j.oceaneng.2017.11.034
45. Zhang N, Yan S, Zheng X, Ma Q. Numerical study on the dynamic interaction between ice and a vertical compliant structure by Smoothed Particle Hydrodynamics. In: *Proceedings of the Thirty-first (2021) International Ocean and Polar Engineering Conference. Rhodes, Greece, June 20–25, 2021.* Rhodes; 2021. EDN: GGDGXH
46. Zhang N, Zheng X, Ma Q, Hu Z. A numerical study on ice failure process and ice-ship interactions by Smoothed Particle Hydrodynamics. *International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering.* 2019;11. doi: 10.1016/j.ijnaoe.2019.02.008
47. Kim H, Daley C. Evaluation of Ice Loads on Offshore Structure Using GPU-Event-Mechanics. In: *Proceedings of the Twenty-ninth (2019) International Ocean and Polar Engineering Conference. Honolulu, Hawaii, USA, June 16–21, 2019.* Honolulu, 2019.
48. Truong DD, Jang B-S. Numerical Simulation of Failure of Sea Level-ice based on the Damage-based Erosion Model. In: *Proceedings of the Thirty-first (2021) International Ocean and Polar Engineering Conference. Rhodes, Greece, June 20–25, 2021.* Rhodes; 2021.

## ОБ АВТОРАХ

### Бережная Мария Алексеевна,

инженер, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет;  
eLibrary SPIN: 6548-5772; e-mail: berezhnaya@smtu.ru

### \* Тряскин Никита Владимирович,

канд. техн. наук, доцент, декан, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет;  
адрес: Россия, 190121, Санкт-Петербург, ул. Лощманская, д. 3;  
eLibrary SPIN: 9857-5588; e-mail: nikita.tryaskin@smtu.ru

### Юй Синьянь,

канд. техн. наук, доцент, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет;  
eLibrary SPIN: 7577-5600; e-mail: yuxinyanvic@yandex.ru

### Чжао Бовэн,

аспирант, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет;  
e-mail: zhbwmail@163.com

## AUTHORS' INFO

### Mariya A. Berezhnaya,

engineer, Saint Petersburg State Marine Technical University;  
eLibrary SPIN: 6548-5772; e-mail: berezhnaya@smtu.ru

### \* Nikita V. Tryaskin,

Cand. Sci. (Engineering), Associated professor, Dean, Saint Petersburg State Marine Technical University;  
address: 3 Lotsmanskaya st, Saint Petersburg, Russia, 190121;  
eLibrary SPIN: 9857-5588; e-mail: nikita.tryaskin@smtu.ru

### Yu Xinyan,

Cand. Sci. (Engineering), Associated professor, Saint Petersburg State Marine Technical University;  
eLibrary SPIN: 7577-5600; e-mail: yuxinyanvic@yandex.ru

### Zhao Bowen,

Postgraduate Student, Saint Petersburg State Marine Technical University;  
e-mail: zhbwmail@163.com

\* Автор, ответственный за переписку / Corresponding author

Оригинальное исследование

УДК 620.193.83

DOI: [https://doi.org/10.52899/24141437\\_2025\\_03\\_341](https://doi.org/10.52899/24141437_2025_03_341)

EDN: JNZLVU

# Исследование активности ингибиторов атмосферной коррозии против плесневых грибов

Е.И. Карзина, М.А. Гайдым

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

## АННОТАЦИЯ

**Актуальность.** Актуальность работы обусловлена необходимостью разработки эффективных методов защиты судового оборудования от биохимического воздействия. Поскольку в процессе жизнедеятельности патогенных грибов вырабатываются метаболиты и ферменты, разрушающие металлические конструкции. Для успешного применения такие материалы должны соответствовать следующим ключевым требованиям: надёжная защита от коррозии; доступность сырья для производства; простота технологического процесса получения; совместимость с различными консервационными основами (масло, топливо, вода); способность подавлять развитие плесневых грибов; низкая токсичность и отсутствие резкого запаха; возможность контроля концентрации в растворе; безопасные методы утилизации отработанных растворов; приемлемая стоимость.

**Цель работы** — оценка антигрибковой эффективности ингибирующих составов, применяемых для защиты металлических конструкций.

**Методы.** Исследование было выполнено с использованием распространённых в судоремонтной практике контактных и летучих ингибиторов коррозии. В работе используется диско-диффузионный метод анализа, позволяющий наглядно увидеть фунгистатический эффект.

**Результаты.** Экспериментальные исследования позволили установить превосходство летучих ингибиторов над контактными. На основании чего построена объективная иерархия ингибиторов по практической применимости, эффективности в борьбе с биохимической коррозией и уровню токсической нагрузки.

**Заключение.** Проведенные исследования демонстрируют необходимость дальнейшего совершенствования методов защиты судового оборудования от биохимической коррозии с акцентом на применение летучих ингибиторов как более эффективного средства защиты.

**Ключевые слова:** патогенные грибы; ингибитор коррозии; фунгистатический эффект; консервация оборудования.

## Как цитировать

Карзина Е.И., Гайдым М.А. Исследование активности ингибиторов атмосферной коррозии против плесневых грибов // Труды Санкт-Петербургского государственного морского технического университета. 2025. Т. 4, № 3. С. 341–346. DOI: 10.52899/24141437\_2025\_03\_341 EDN: JNZLVU

Original Study Article

DOI: [https://doi.org/10.52899/24141437\\_2025\\_03\\_341](https://doi.org/10.52899/24141437_2025_03_341)

EDN: JNZLVU

# Investigation of Atmospheric Corrosion Inhibitors' Activity Against Mold Fungi

Ekaterina I. Karzina, Marina A. Gaidym

Saint Petersburg State Marine Technical University, Saint Petersburg, Russia

## ABSTRACT

**BACKGROUND:** There is a need to develop effective methods for protecting marine equipment from biochemical corrosion. In addition, pathogenic fungi produce metabolites and enzymes that destroy metal structures. For successful use, such materials must meet the following key requirements: reliable corrosion protection; availability of raw materials for production; user-friendly processes; compatibility with various preservative bases (oil, fuel, and water); the ability to suppress the development of mold fungi; low toxicity and no pungent odor; the ability to control the concentration in the solution; safe disposal methods of used solutions, and affordable cost.

**AIM:** To evaluate the antifungal efficacy of inhibitory compounds used to protect metal structures.

**METHODS:** The study used contact and volatile corrosion inhibitors common in ship repair practice. The study involves the disk diffusion test, which allows to clearly see the fungistatic effect.

**RESULTS:** Experimental studies have shown that volatile inhibitors surpass contact ones. In the premises, an objective hierarchy of inhibitors has been built based on their applicability, biochemical corrosion efficacy, and toxic load.

**CONCLUSION:** The studies show the need for further improvement of methods for protecting ship equipment from biochemical corrosion with an emphasis on the use of volatile inhibitors as a more effective means of protection.

**Keywords:** pathogenic fungi; corrosion inhibitor; fungistatic effect; equipment preservation.

## To cite this article

Karzina EI, Gaidym MA. Investigation of Atmospheric Corrosion Inhibitors' Activity Against Mold Fungi. *Transactions of the Saint Petersburg State Marine Technical University*. 2025;4(3):341–346. DOI: [10.52899/24141437\\_2025\\_03\\_341](https://doi.org/10.52899/24141437_2025_03_341) EDN: JNZLVU

Submitted: 11.07.2025

Accepted: 29.07.2025

Published online: 22.09.2025

## ВВЕДЕНИЕ

Судовое металлическое оборудование под действием агрессивной среды выходит из строя раньше времени. Для защиты металла применяются различные средства борьбы с коррозией. В том числе ингибиторы, которые позволяют предотвратить развитие химической, электрохимической и биохимической коррозии. Биохимическая коррозия возникает в результате продуктов жизнедеятельности микроорганизмов. В процессе роста патогенные грибы образуют, разрушающие металл, метаболиты и ферменты. В условиях повышенной влажности морской атмосферы и теплого климата на металлической поверхности создается благоприятная среда для развития плесневых грибов. Ингибиторы атмосферной коррозии должны эффективно подавлять их рост и развитие. Принцип работы заключается в образовании защитной пленки, которая препятствует проникновению влаги и кислорода, необходимых для жизнедеятельности грибов. Также фунгистатическим эффектом обладают активные компоненты ингибитора, которые подавляют метаболические процессы в клетках грибов, препятствуя их размножению и росту [1].

**Цель исследования** — изучение эффективности ингибиторов коррозии в подавлении роста и развития патогенных грибов на поверхности металлических конструкций судового оборудования.

## МЕТОДЫ

### 1. Фунгистатическая активность ингибиторов атмосферной коррозии

Плесневые грибы — это сложные организмы, отличающиеся высокой адаптивностью и устойчивостью к разнообразным химическим веществам. Благодаря уникальным ферментативным системам они способны эффективно перерабатывать как органические, так и неорганические соединения, что обеспечивает их резистентность к множеству химических воздействий. Это усложняет задачу разработки эффективных методов защиты металлических конструкций от биокоррозии. В работе исследуются свойства ингибиторов на фунгистатическую активность, способных предотвращать развитие как химической, так и микробиологической коррозии [2].

Для проведения исследований использовались следующие ингибиторы.

**ФМТ** — ингибитор атмосферной коррозии. Жидкая смесь активных компонентов на основе модифицированных жирных кислот талового масла с добавлением производных хлорофилла. Относится к 4 классу опасности веществ для здоровья человека и окружающей среды. Используется для временной защиты или консервации стальных изделий и конструкций во время их хранения и транспортировки в условиях умеренного климата. Угнетает развитие микроорганизмов ограничивая доступ

кислорода и влаги, создавая пленку на поверхности металла.

**Н-М-1** — контактный ингибитор коррозии. Представляет собой прозрачную жидкость, которая при нанесении на металл образует защитную пленку на поверхности. Образующийся слой также ограничивает доступ кислорода и влаги, взаимодействуя с клеточными структурами грибов. Относится к веществам 3 класса опасности для здоровья человека и окружающей среды [3].

**ВНХ-Л-20** — летучий ингибитор атмосферной коррозии. Производится в виде белого кристаллического порошка, который легко растворяется в воде и других растворителях. Обладает широким спектром действия. Принцип работы заключается в экранировании металла от окружающей среды. Относится к веществам 1 класса опасности для здоровья человека и окружающей среды — чрезвычайно опасные. Требуется обязательное соблюдение техники безопасности при его использовании и хранении.

**ВНХ-Л-49** — комбинированный ингибитор, сочетающий летучие и контактные свойства. Представляет собой светло-желтую жидкость. Имеет обширную область применения. Механизм действия основан на создании защитного барьера, который изолирует металл от воздействия окружающей среды. Также, как и ВНХ-Л-20 является веществом первого класса опасности, что представляет серьезный риск для здоровья людей и экосистемы [2].

**ЦГА** (Циклический галактозаминный агент) — контактный ингибитор с высокой фунгистатической активностью. Бесцветная жидкость, взаимодействует с клеточными стенками грибов, нарушая их жизнедеятельность и препятствуя размножению. ЦГА относится ко второму классу опасности [4].

При выборе ингибитора стоит учитывать класс опасности и применять наименее опасный состав.

### 2. Применение и исследование

Для оценки эффективности выбранных ингибиторов требуется подобрать рабочий интервал концентрации, в пределах которой обеспечивается фунгистатический эффект, определить время защитного действия ингибитора и провести визуальную оценку скорости роста грибов на обработанных и необработанных поверхностях.

Для определения фунгистатической эффективности исследуемых материалов были выбраны широко распространенные и активные патогенные грибы, вызывающие биоповреждения: *Penicillium chrysogenum*, *Penicillium expansum*, *Aspergillus niger*, *Trichoderma viride*, *Clostridium resinae* и *Aspergillus oryzae*. Выделенные грибы имеют возможность получать энергию как из органических, так и из неорганических материалов. Эти микроорганизмы представляют серьезную угрозу для различных материалов и были выбраны для тестирования ввиду их способности активно разрушать поверхности [5].

### 3. Методика проведения исследований

#### 1. Стерилизация

Стеклянная посуда стерилизовалась. Для исследования были использованы чашки Петри, которые предварительно заполняли питательной средой. Питательная среда Чапека (состав: сахароза — 30 г/дм<sup>3</sup>, NaNO<sub>3</sub> — 3 г/дм<sup>3</sup>, KH<sub>2</sub>PO<sub>4</sub> — 1 г/дм<sup>3</sup>, MgSO<sub>4</sub>·7H<sub>2</sub>O — 0,5 г/дм<sup>3</sup>, KCl — 0,5 г/дм<sup>3</sup>, FeSO<sub>4</sub>·7H<sub>2</sub>O — 0,01 г/дм<sup>3</sup>, агар — 15 г/дм<sup>3</sup>) автоклавировалась насыщенным водяным паром при повышенном давлении. В эту среду были добавлены специальные составы, включающие диски из фильтровальной бумаги. Эти диски пропитывали исследуемыми растворами, что позволяло впоследствии оценить их влияние на рост микроорганизмов.

При визуальной оценке наблюдалось наличие или отсутствие зоны задержки роста микроорганизмов вокруг дисков.

При необходимости измерялись диаметры зон отсутствия роста для оценки эффективности исследуемых растворов.

Таким образом, данная методика позволяла оценить влияние различных растворов на рост микроорганизмов и определить их фунгистатическую или фунгицидную активность.

Сосуды закрывались ватными пробками для предотвращения загрязнения.

#### 2. Посев микроорганизмов

На поверхность среды с дисками наносили суспензию тест-объектов 0,5 мл с концентрацией 10<sup>6</sup> КОЕ/мл — микроорганизмов, которые использовались для исследования. Шпателем Дригальского равномерно распределяли микроорганизмы по поверхности агара. Это делалось для того, чтобы оценить влияние исследуемых растворов на их рост и развитие.

#### 3. Испытание ингибиторов

Чашки Петри помещали в термостат, где поддерживалась постоянная температура 24°C в течение 5 суток. Это оптимальная температура для роста большинства микроорганизмов. Такой период позволял микроорганизмам

полностью проявить свои свойства и реакцию на воздействие исследуемых растворов.

#### 4. Анализ результатов после инкубации

По завершении периода инкубации проводили измерение линейного роста колоний грибов. Оценивался диаметр каждой колонии. Полученные данные сравнивались между контрольными образцами, в которых не использовались фунгициды (среда без препаратов), и образцами, в которые были добавлены исследуемые препараты. Проведение сравнительного анализа позволяло определить эффективность исследуемых препаратов в подавлении роста грибов. Оценивалось, насколько успешно препараты препятствовали развитию колоний по сравнению с контрольной средой, где фунгициды отсутствовали. Это давало возможность сделать выводы о фунгистатической активности тестируемых веществ. Оценку активности ингибиторов против патогенных грибов осуществляли по критерию присутствия или отсутствия зоны с задержкой роста.

Эффективность подавления роста грибов (тормозной эффект) определяли с использованием формулы Эббота:

$$\Xi = \left( \frac{D_k - D_o}{D_k} \right) \cdot 100\%,$$

где  $\Xi$  — процент торможения роста в сравнении с контрольной группой;  $D_k$  — диаметр колоний в контрольной группе (без добавления препаратов);  $D_o$  — диаметр колоний в опытной группе (с добавлением исследуемых препаратов).

Формула позволяет вычислить относительное снижение диаметра колоний грибов в присутствии исследуемых веществ по сравнению с контрольными образцами. Полученное значение в процентах отражает эффективность ингибирования роста грибов. Чем ближе значение  $\Xi$  к 100%, тем сильнее подавляющее действие исследуемого препарата на развитие грибковых колоний.

#### 5. Интерпретация результатов

Значение  $\Xi$  близкое к 0% указывает на отсутствие эффекта препарата; значения в диапазоне 0–100% показывают степень подавления роста грибов; 100%

**Таблица 1.** Оценка активности ингибиторов против патогенных грибов

**Table 1.** Evaluation of inhibitor activity against pathogenic fungi

Ингибиторы коррозии	Патогенные грибы					
	<i>Penicillium chrysogenum</i>	<i>Penicillium expansum</i>	<i>Aspergillus niger</i>	<i>Trichoderma viride</i>	<i>Clostridium resinae</i>	<i>Aspergillus oryzae</i>
ФМТ	–	+	–	–	–	–
Н-М-1	–	–	+	+	–	–
ВНХ-Л-20	–	–	–	–	–	–
ВНХ-Л-49	–	–	–	–	–	–
ЦГА	–	–	+	–	–	–

означает полное ингибирование роста колоний в присутствии препарата.

В ходе проведённых экспериментов были получены данные о том, насколько эффективно различные ингибиторы справляются с подавлением роста этих грибов. Основные результаты исследований систематизированы в таблице [6].

## РЕЗУЛЬТАТЫ

При сравнении двух типов ингибиторов с разным принципом защиты, наиболее высокую степень фунгистатической активности проявили летучие ингибиторы. Циклический галактозаминный агент демонстрирует мощное ингибирующее действие на рост грибов по всей площади чашки Петри. Расчет по формуле Эббота позволил оценить активность контактных ингибиторов и его способность сдерживать рост около — 4–6% грибов. Ингибитор ФМТ относится к малоопасным веществам, однако продемонстрировал высокую результативность в борьбе с грибковой деградацией материалов. Примечательно, что ФМТ демонстрирует высокую эффективность даже при минимальной концентрации в один процент в дизельном топливе. Особенность его действия обусловлена наличием в составе медных соединений хлорофилла и смоляных кислот. Минеральные масла и топливо, которые нередко выступают в качестве питательной среды для сапрофитных грибов, не оказывают влияния на эффективность действия ингибитора. Это подтверждает его практическую ценность в реальных условиях эксплуатации.

Проведенный эксперимент позволит выявить эффективные материалы для защиты поверхностей от патогенных грибов и определить их оптимальные условия применения в различных эксплуатационных сценариях.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Для защиты судового оборудования от коррозии применяются как водные, так и масляные консерванты. Предпочтительно использовать водные растворы ингибиторов, т.к. при удалении консервации стоки не обладают токсическим действием на экосистему. Однако у водных растворов есть существенный недостаток — в них часто происходит размножение микроорганизмов, что может привести к развитию биохимической коррозии. Значит, при выборе антикоррозионной защиты необходимо учитывать баланс между эффективностью защиты от коррозии и необходимостью предотвращения роста микроорганизмов в водной фазе консерванта.

Для снижения токсической нагрузки на экосистему лучше использовать ингибиторы коррозии, обладающие низкой токсичностью, такие как ФМТ. Биоцидное действие обусловлено спецификой его химического состава.

Который состоит из малоопасных соединений меди в форме медных производных хлорофилла и смоляных кислот.

Наибольшую сопротивляемость ингибиторам проявил пеницилл распротёртый. Однако в морской среде этот гриб не встречается. Он распространен только в почве.

Ингибитор Н-М-1 в концентрации один процент на водной основе подавляет рост всех патогенных микроорганизмов, кроме рода Аспергилл.

## ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ИНФОРМАЦИЯ

**Вклад авторов.** Е.И. Карзина — поиск публикаций по теме статьи, написание текста рукописи; М.А. Гайдим — редактирование текста рукописи; Е.И. Карзина, М.А. Гайдим — 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, данные).

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

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

## ADDITIONAL INFORMATION

**Author contributions:** Ekaterina I. Karzina: investigation, writing—original draft; M.A. Gaidym: writing—review & editing; Ekaterina I. Karzina, M.A. Gaidym: expert review, writing—review & editing. All the authors approved the version of the manuscript to be published and agree 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:** No funding.

**Disclosure of interests:** The authors have no relationships, activities, or interests for the last three years related to for-profit or not-for-profit third parties whose interests may be affected by the content of the article.

**Statement of originality:** No previously obtained or published material (text or data) was used in this study or article.

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

**Provenance and peer review:** This paper was submitted unsolicited and reviewed following the standard procedure. The peer review process involved one reviewer, a member of the editorial board, and the in-house scientific editor.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Крымская Р.С. Совершенствование методов консервации продуктов судостроения. дисс. канд. техн. наук. М., 2013. EDN: SUYXDL
2. Крымская Р.С., Гармашова И.В., Ананьева Е.Н., Трусов В.И. Особенности фунгистатической активности ингибиторов атмосферной коррозии по отношению к плесневым грибам // Естественные и технические науки. № 6(56). 2011. С. 323–328. EDN: OPBZYZ
3. Пласкеева Е.И. Совершенствование методов восстановления защитных покрытий при ремонте морской техники. дисс. канд. техн. наук. М., 2021. EDN: VFE0VS
4. Пласкеева Е.И., Богданова С.Е., Крымская Р.С. Биологическое тестирование технологий водной консервации металлоизделий // Бутлеровские сообщения. 2019. Т. 60, № 12. С. 70–74. EDN: MZOMZP
5. Пласкеева Е.И., Трусов В.И. Защита от коррозии труднодоступных конструкций отсеков судов // Морские интеллектуальные технологии. 2019. Т. 2, № 3(45) С. 107–110. EDN: TNLBVK
6. Ананьева Е.Н., Соколова М.А. Исследование биостойкости защитных покрытий судовых конструкций // Защита металлов. 2018. Т. 54, № 3. С. 278–284.

## REFERENCES

1. Krymskaya RS. *Improving the methods of preserving shipbuilding products* [dissertation] Moscow; 2013. (In Russ.) EDN: SUYXDL
2. Krymskaya RS, Garmashova IV, Ananyeva EN, Trusov VI. Features of fungistatic activity of atmospheric corrosion inhibitors in relation to mold fungi. *Natural and technical sciences*. 2011;6(56):323–328. (In Russ.) EDN: OPBZYZ
3. Plaskeyeva EI. *Improving the methods of restoring protective coatings during the repair of marine equipment* [dissertation] Moscow; 2021. (In Russ.) EDN: VFE0VS
4. Plaskeyeva EI, Bogdanova SE, Krymskaya RS. Biological testing of water preservation technologies for metal products. *Butlerov communications*. 2019;60(12):70–74. (In Russ.) EDN: MZOMZP
5. Plaskeyeva EI, Trusov VI. Corrosion protection of hard-to-reach ship compartment structures. *Marine intellectual technologies*. 2019;2(3(45)):107–110. (In Russ.) EDN: TNLBVK
6. Ananyeva EN, Sokolova MA. Study of bioresistance of protective coatings of ship structures. *Protection of metals*. 2018;54(3):278–284. (In Russ.)

## ОБ АВТОРАХ

### \* Карзина Екатерина Ивановна,

канд. техн. наук, доцент, кафедра химии; Санкт-Петербургский государственный морской технический университет;  
адрес: Россия, 190121, Санкт-Петербург, ул. Лощманская, д. 3;  
eLibrary SPIN: 7638-3213;  
e-mail: ekaterina.plaskeeva@list.ru

### Гайдым Марина Андреевна,

ассистент, кафедра химии; аспирант, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет;  
eLibrary SPIN: 5395-5509;  
e-mail: marina.zhdanova.1998@mail.ru

## AUTHORS' INFO

### \* Ekaterina I. Karzina,

Cand. Sci. (Engineering), Assistant Professor, Department of Chemistry Saint Petersburg State Marine Technical University;  
address: 3 Lotsmanskaya st, Saint Petersburg, 190121, Russia;  
eLibrary SPIN: 7638-3213;  
e-mail: ekaterina.plaskeeva@list.ru

### Marina A. Gaidym,

Assistant, Department of Chemistry; Postgraduate Student, Saint Petersburg State Marine Technical University;  
eLibrary SPIN: 5395-5509;  
e-mail: marina.zhdanova.1998@mail.ru

\* Автор, ответственный за переписку / Corresponding author



Оригинальное исследование

УДК 621.791.9

DOI: [https://doi.org/10.52899/24141437\\_2025\\_03\\_347](https://doi.org/10.52899/24141437_2025_03_347)

EDN: VKZIBF

# Теоретическое описание транспортировки частиц порошка в рабочую зону прямого лазерного выращивания

Д.В. Мукин, Н.В. Ларионов, В.М. Молчановский, И.Н. Юдин

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

## АННОТАЦИЯ

**Актуальность.** Характеристики потока порошка при транспортировке в рабочую зону прямого лазерного выращивания влияют на взаимодействие порошка, лазера и ванны расплава, что напрямую определяет геометрию валика и качество наплавляемого материала. Управление пространственным распределением потока порошка в зоне обработки является ключевым параметром для повышения эффективности и воспроизводимости процесса.

**Цель работы** — разработка полуаналитического подхода для нахождения траекторий частиц порошка в задаче прямого лазерного выращивания с использованием дискретного струйного сопла.

**Методы.** Поле скоростей газа-носителя в полупространстве без препятствий, заполненном защитным газом, аппроксимируется аналитическим решением уравнения Эйлера. Траектории частиц порошка находятся численным интегрированием уравнения движения, учитывающим силу Стокса.

**Результаты.** Получены траектории частиц порошка в зависимости от распределения скорости газа-носителя на выходе из трубочки путем применения точного решения уравнения Эйлера для конкретных параметров частиц порошка и газа-носителя, используемых в аддитивных технологиях.

**Выводы.** В работе представлена элементарная полуаналитическая модель транспортировки частиц порошка в задаче прямого лазерного выращивания, на основании которой становится возможным получение пространственного распределения частиц порошка в зоне обработки.

**Ключевые слова:** затопленная струя Ландау; взвешенные частицы; прямое лазерное выращивание; аддитивные технологии.

## Как цитировать

Мукин Д.В., Ларионов Н.В., Молчановский В.М., Юдин И.Н. Теоретическое описание транспортировки частиц порошка в рабочую зону прямого лазерного выращивания. // Труды Санкт-Петербургского государственного морского технического университета. 2025. Т. 4, № 3. С. 347–354. DOI: 10.52899/24141437\_2025\_03\_347 EDN: VKZIBF

Original Study Article

DOI: [https://doi.org/10.52899/24141437\\_2025\\_03\\_347](https://doi.org/10.52899/24141437_2025_03_347)

EDN: VKZIBF

# Theoretical Description of Powder Delivery to Direct Laser Deposition Area

Dmitriy V. Mukin, Nukolay V. Larionov, Vasiliy M. Molchanovsky, Ilia N. Udin

Saint Petersburg State Marine Technical University, Saint Petersburg, Russia

## ABSTRACT

**BACKGROUND:** The parameters of powder flow delivered to the direct laser deposition area affect the interaction of the powder, laser, and melt pool, directly determining the bead shape and the quality of the deposited material. Controlling the spatial distribution of powder flow in the processing area is key for improving the process performance and repeatability.

**AIM:** To develop a semianalytic approach to find powder particle trajectories in the problem of direct laser deposition using a discrete jet nozzle.

**METHODS:** The carrier gas flowfield in an unobstructed half-space filled with a protective gas is approximated by an analytical solution of the Euler equation. Powder trajectories are determined by numerical integration of the equation of motion based on the Stokes' law.

**RESULTS:** Powder trajectories are determined by the distribution of the carrier gas velocity at the tube outlet by applying the exact solution of the Euler equation for specific parameters of powder particles and carrier gas used in additive manufacturing.

**CONCLUSION:** The paper presents an elementary semianalytic model of powder delivery in the problem of direct laser deposition allowing to obtain the spatial distribution of powder particles in the processing area.

**Keywords:** Landau–Squire jet; suspended particles; direct laser deposition; additive manufacturing.

## To cite this article

Mukin DV, Larionov NV, Molchanovsky VM, Udin IN. Theoretical Description of Powder Delivery to Direct Laser Deposition Area. *Transactions of the Saint Petersburg State Marine Technical University*. 2025;4(3):347–354. DOI: 10.52899/24141437\_2025\_03\_347 EDN: VKZIBF

## ВВЕДЕНИЕ

В предыдущей работе авторов [1] было проведено теоретическое исследование доставки частиц порошка газовым потоком в зону прямого лазерного выращивания. Задача решалась в два этапа. Сначала путем решения уравнения Навье – Стокса, осредненного по Рейнольдсу, рассчитывалось поле скоростей газа, вырывающегося в ограниченное пространство, заполненное тем же газом. Далее интегрировалось уравнение движения частицы с учетом силы Стокса, обусловленной найденным полем. Таким образом удалось описать траектории частиц порошка в рабочей области.

В рассматриваемой задаче несущий газ, вырывающийся из трубочки или сопла в область, занятую тем же газом, представляет собой известную проблему затопленной струи. Эта проблема для случая несжимаемой жидкости, вырывающейся из начала координат в ту же жидкость, была решена Л.Д. Ландау [2]. Обобщение этого решения, а также его применение в некоторых прикладных технических задачах описано в [3, 4].

Учитывая сказанное выше, в данной работе будет рассмотрен полуаналитический подход для нахождения траекторий частиц порошка в задаче прямого лазерного выращивания. Аналитическая часть будет представлена явным решением для затопленной струи невязкой несжимаемой жидкости. Уравнение движения частицы в заданной струе, в режиме стокового обтекания [5], будет интегрироваться численно.

Новизной представленной работы является применение точного решения уравнения Эйлера для конкретных параметров частиц порошка и газа-носителя, используемых в аддитивных технологиях.

## ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ. ДВИЖЕНИЕ ЧАСТИЦ ПОРОШКА В ЗАТОПЛЕННОЙ СТРУЕ НЕВЯЗКОЙ ЖИДКОСТИ

### Поле скоростей идеальной жидкости

Для определенности будем говорить о трубчатых соплах. Направим ось  $z$  вдоль оси одной из трубочек, которая сама по себе может быть либо соплом, либо диффузором. Газ-носитель вырывается из трубочки в область, заполненную тем же газом. В этой постановке, для данной трубочки, задача является аксиально-симметричной. Поэтому поле скоростей газа  $\mathbf{u}$ , записанное в цилиндрической системе координат, имеет только две компоненты  $\mathbf{u} = (u_r(r, z), u_z(r, z))$  и не зависит от полярного угла  $\varphi$ .

Для нахождения  $\mathbf{u}$  нужно решить стационарное уравнение Навье – Стокса

$$(\mathbf{u}\nabla)\mathbf{u} - \frac{\eta}{\rho_0} \Delta \mathbf{u} = -\nabla \frac{p}{\rho_0}, \quad (1)$$

где  $\rho_0$  — постоянная плотность,  $p = p(r, z)$  — давление и  $\eta$  — динамическая вязкость.

Пренебрежем вязкостью, положив в (1)  $\eta = 0$ . В этом случае, как показано в [3], физически правильное решение уравнения (1) будет иметь вид

$$\begin{cases} u_r(r, z) = \frac{1}{z} \frac{D}{\xi \sqrt{1 + \xi^2}} (\sqrt{1 + \xi^2} - 1), \\ u_z(r, z) = \frac{1}{z} \frac{D}{\sqrt{1 + \xi^2}}, \end{cases} \quad (2)$$

где  $\xi = r/z$  — автомодельная переменная, константа  $D$  определяет геометрию сопла:  $D < 0$  — сужающаяся трубка тока — сопло;  $D > 0$  — расширяющаяся трубка тока — диффузор.

Константа  $D$  определяется через полный поток массы  $Q$  [3], проходящий через поперечное сечение трубочки радиусом  $r_0$ :

$$Q = 2\pi\rho_0 r_0 |D|. \quad (3)$$

Выражение для давления:

$$p(r, z) = p_{fit} - \frac{\rho_0}{z^2} \frac{D^2}{\xi^2 \sqrt{1 + \xi^2}} (\sqrt{1 + \xi^2} - 1), \quad (4)$$

где  $\rho_0$  — плотность,  $p_{fit}$  — константа.

Решения (2)–(4) удовлетворяют уравнению Бернулли

$$\rho_0 \frac{u_r^2(r, z) + u_z^2(r, z)}{2} + p(r, z) = p_{fit}. \quad (5)$$

При этом для безграничного пространства выполняется условие потенциального течения  $\nabla \times \mathbf{u} = 0$ . И тогда  $p_{fit}$  одна для всех линий тока.

Граничные условия для решения (2) – (4):

$$\begin{cases} \lim_{r \rightarrow 0} \{u_r(r, z), u_z(r, z), p(r, z)\} = \left\{0, \frac{D}{z}, p_{fit} - \frac{D^2 \rho_0}{2z^2}\right\}, \\ \lim_{z \rightarrow \infty} \{u_x(r, z), u_z(r, z), p(r, z)\} = \{0, 0, p_{fit}\}. \end{cases} \quad (6)$$

### Уравнение движения для частицы

Теперь выпишем уравнение движения для частицы порошка:

$$m_p \frac{d}{dt} \mathbf{v} = \mathbf{F}_D, \quad (7)$$

где  $\mathbf{v}$  — вектор скорости частицы,  $m_p$  — масса частицы. Сила Стокса

$$\mathbf{F}_D = 6\pi\eta r_p \Phi \cdot (\mathbf{u} - \mathbf{v}), \quad (8)$$

где  $r_p$  — радиус частицы, которая предполагается сферической,  $\Phi$  — коэффициент, учитывающий поправки, зависящие от чисел  $M, Re, Kn$  [5–7].

Отметим, что сила (8), линейная по скорости, корректно описывает движения частиц при малых числах Рейнольдса. Оценку числа Рейнольдса для нашей задачи проведем ниже.

Перепишем (7) для удобства в цилиндрической системе координат:

$$\begin{cases} \frac{d^2 r}{dt^2} = \frac{1}{\tau_p} \left( u_r - \frac{dr}{dt} \right), \\ \frac{d^2 z}{dt^2} = \frac{1}{\tau_p} \left( u_z - \frac{dz}{dt} \right), \end{cases} \quad (9)$$

где  $u_r, u_z$  представлены формулами (2) и было введено характерное время для частицы согласно

$$\tau_p = \frac{2}{9\Phi} \frac{r_p^2 \rho_p}{\eta}, \quad (10)$$

где плотность частицы  $\rho_p = m_p / \left( \frac{4\pi}{3} r_p^3 \right)$ .

## Характерные величины.

### Свойство газа-носителя и частиц порошка

Введем следующие характерные для процесса прямого лазерного выращивания величины:  $L_0$  — характерная длина,  $V_0$  — характерная скорость,  $T_0 = L_0 / V_0$  — характерное время.

Величине  $L_0 = 1$  см будет соответствовать характерное расстояние от выхода из трубочки до рабочей зоны выращивания, а величине  $V_0 = 10^3$  см/с — скорость потока газа-носителя на выходе из трубочки в направлении оси  $z$ . Таким образом,  $T_0 = 10^{-3}$  с.

Характерный радиус трубочки  $r_0 = 10^{-1}$  см. Характерное давление на выходе из трубочки  $P_0 = 2 \cdot 10^5$  Па =  $2 \cdot 10^6$  г/см $\cdot$ с $^2$ .

В качестве газа-носителя выберем аргон. Тогда при  $T = 300$  К и  $p = P_0$  имеем:  $\rho_g = 1,6 \cdot 10^{-3}$  г/см $^3$  — плотность,  $\eta_g = 2,23 \cdot 10^{-4}$  г/см $\cdot$ с — динамическая вязкость.

Отсюда характерные значения полного потока массы (3)  $Q_0 = \rho_g V_0 \pi r_0^2 = 5 \cdot 10^{-2}$  г/с и величины

$$D_0 = \frac{Q_0}{2\pi\rho_g r_0} = \frac{V_0 r_0}{2} = 0,5 \cdot 10^2 \text{ см}^2 / \text{с}.$$

В качестве материала для частиц порошка выберем сталь, типичные значения параметров которой равны:  $r_p = 10^{-2}$  см — средний радиус,  $\rho_p = 7,82$  г/см $^3$  — плотность.

Определив различные масштабы задачи, можно оценить числа Рейнольдса.

Отметим, что число Рейнольдса для газа внутри трубочки  $Re_{in} = \rho_g V_0 r_0 / \eta_g = 0,7 \cdot 10^3$ , т.е. поток носит промежуточный характер — где-то турбулентный, где-то ламинарный.

Для области между соплом и подложкой имеем  $Re_{out} = \rho_g V_0 L_0 / \eta_g = 7 \cdot 10^3$ , т.е. также имеем промежуточный характер для потока.

Рассчитаем число Рейнольдса для частицы в потоке газа-носителя:  $Re_p = \rho_g V_0 r_p / \eta_g = 0,7 \cdot 10^2$ . Таким образом,  $Re_p \leq 10^2$ . Это означает, что происходит ламинарное обтекание частицы. Что оправдывает использование силы Стокса в (7), пропорциональной первой степени скорости.

## Безразмерные уравнения

Перепишем нужные нам уравнения в безразмерном виде, выразив все величины в единицах  $(L_0, V_0, T_0, P_0, D_0)$ .

Для поля скоростей идеальной жидкости и давления имеем

$$\begin{cases} \tilde{u}_r(\tilde{r}, \tilde{z}) = \frac{1}{\tilde{z}} \frac{\delta \cdot \tilde{D}}{\xi \sqrt{1+\xi^2}} \left( \sqrt{1+\xi^2} - 1 \right), \\ \tilde{u}_z(\tilde{r}, \tilde{z}) = \frac{1}{\tilde{z}} \frac{\delta \cdot \tilde{D}}{\sqrt{1+\xi^2}}, \end{cases} \quad (2')$$

$$\tilde{p}(\tilde{r}, \tilde{z}) = \tilde{p}_{fit} - \frac{B}{\tilde{z}^2} \frac{\delta^2 \cdot \tilde{D}^2}{\xi^2 \sqrt{1+\xi^2}} \left( \sqrt{1+\xi^2} - 1 \right), \quad (4')$$

где  $\left( \tilde{u}_r = \frac{u_r}{V_0}, \tilde{u}_z = \frac{u_z}{V_0} \right)$ ,  $\tilde{p} = \frac{p}{P_0}$ ,  $\tilde{p}_{fit} = \frac{P_{fit}}{P_0}$ ,

$\left( \tilde{r} = \frac{r}{L_0}, \tilde{z} = \frac{z}{L_0} \right)$  и введены следующие безразмерные

величины:  $\tilde{D} = \frac{D}{D_0} = \frac{2D}{V_0 r_0}$ ,  $B = \frac{\rho_g V_0^2}{P_0} = 0,8 \cdot 10^{-3}$ ,

$$\delta = \frac{r_0}{2L_0}.$$

Уравнение движения для частицы порошка примет следующий вид:

$$\begin{cases} \frac{d^2 \tilde{r}}{d\tilde{t}^2} = \gamma \left( \tilde{u}_r - \frac{d\tilde{r}}{d\tilde{t}} \right), \\ \frac{d^2 \tilde{z}}{d\tilde{t}^2} = \gamma \left( \tilde{u}_z - \frac{d\tilde{z}}{d\tilde{t}} \right), \end{cases} \quad (9')$$

где  $\tilde{t} = t / T_0$  — безразмерное время

и  $\gamma = \frac{T_0}{\tau_p} = \frac{9}{2} \frac{\eta L_0}{V_0 r_p^2 \rho_p} \Phi = (1,25 \cdot 10^{-3}) \Phi$ .

## РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТОВ

### Поле скоростей газа-носителя

Вначале построим линии тока векторного поля  $\vec{u}(\tilde{x}, \tilde{z}) = (\tilde{u}_r(\tilde{x}, \tilde{z}), \tilde{u}_z(\tilde{x}, \tilde{z}))$ , где  $\tilde{x} \equiv \tilde{r}$ .

Будем считать, что трубочка представляет собой диффузор, т.е.  $\tilde{D} > 0$ . В этом случае поток движется вдоль оси  $z$  ( $\tilde{u}_z > 0$ ) и линии тока расходятся от нее ( $\tilde{u}_r > 0$ ).

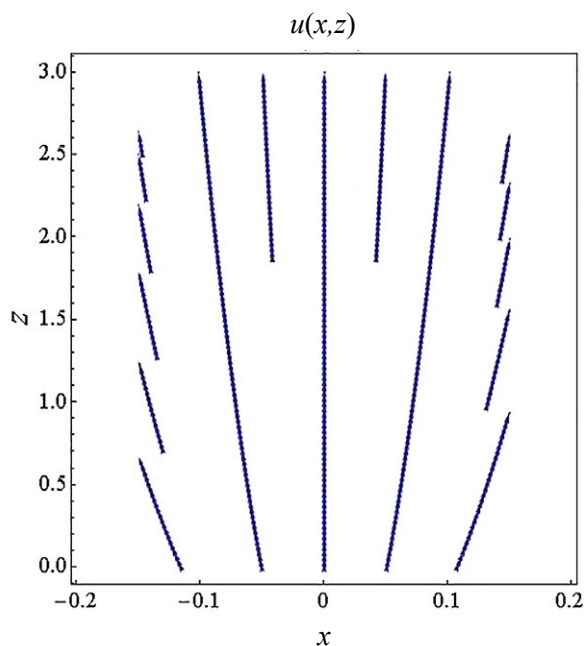
Для исключения расходимости начало отсчета по оси струи сместим вглубь трубочки:  $\tilde{z} \rightarrow \tilde{z} + a$ , где  $a > 0$ .

Пусть газ-носитель вырывается из трубочки радиусом  $\tilde{r}_0 = 0,15$ . Расстояние от трубочки до рабочей поверхности равно  $(\tilde{z}_2 - \tilde{z}_1) = 3$ , где  $\tilde{z}_1 = 0$  — координата выхода газа из трубочки, а значение  $\tilde{z}_2 = 3$  соответствует рабочей поверхности.

Выберем следующие значения коэффициентов:  $\tilde{D} = 10$ ,  $\delta = 0,05$ .

На рис. 1 построен график поля скоростей газа-носителя.

Значение скорости газа на оси на выходе из трубочки равно  $(\tilde{u}_r(0, \tilde{z}_1) = 0, \tilde{u}_z(0, \tilde{z}_1) = 0,5)$ , а на рабочей поверхности —  $(\tilde{u}_r(0, \tilde{z}_2) = 0, \tilde{u}_z(0, \tilde{z}_2) = 0,125)$ , т.е. компонента скорости  $\tilde{u}_z$  уменьшается.



**Рис. 1.** Векторное поле скоростей газа-носителя  $\vec{u}(\tilde{x}, \tilde{z})$ .  
**Fig. 1.** Vector field of carrier gas velocities  $\vec{u}(\tilde{x}, \tilde{z})$ .

### Траектории частиц

Теперь рассмотрим траектории частиц порошка, вылетающих из трубочки.

На рис. 2, а показаны траектории частиц с разными начальными значениями поперечной координаты  $\tilde{x}_1$ :

$\pm 0,15$  — зеленые линии,  $\pm 0,1$  — синие линии,  $\pm 0,05$  — красные линии. Начальные скорости частиц совпадают со скоростью самого потока на выходе из трубочки —  $\mathbf{v}(t=0) = \mathbf{u}(\tilde{x}_1, \tilde{z}_1 = 0) \equiv \mathbf{u}(\tilde{x}_1)$ :  
 $\mathbf{u}(\tilde{x}_1 = \pm 0,05) = (0,012; 0,499)$ ,  
 $\mathbf{u}(\tilde{x}_1 = \pm 0,1) = (0,024; 0,497)$ ,  
 $\mathbf{u}(\tilde{x}_1 = \pm 0,15) = (0,036; 0,494)$ .

Траектории частиц естественным образом повторяют расширяющуюся трубку тока.

На рис. 2, б построены траектории частиц с теми же начальными координатами, что и на рис. 2, а, но начальные скорости у всех частиц одинаковы и равны  $\mathbf{v}(t=0) = \mathbf{u}(\tilde{x}_1 = \pm 0,05) = (0,012; 0,499)$ .

Такое одинаковое задание начальных скоростей частиц, ведущее к меньшему разбросу поперечной компоненты скорости, обеспечивает лучшую фокусировку пучка.

Для всех расчетов величина  $\Phi$  [см. текст после формулы (9')] бралась равной единице [5].

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе с помощью аналитического решения уравнения Эйлера исследована зависимость траекторий частиц порошка от распределения скорости газа-носителя на выходе из трубочки.

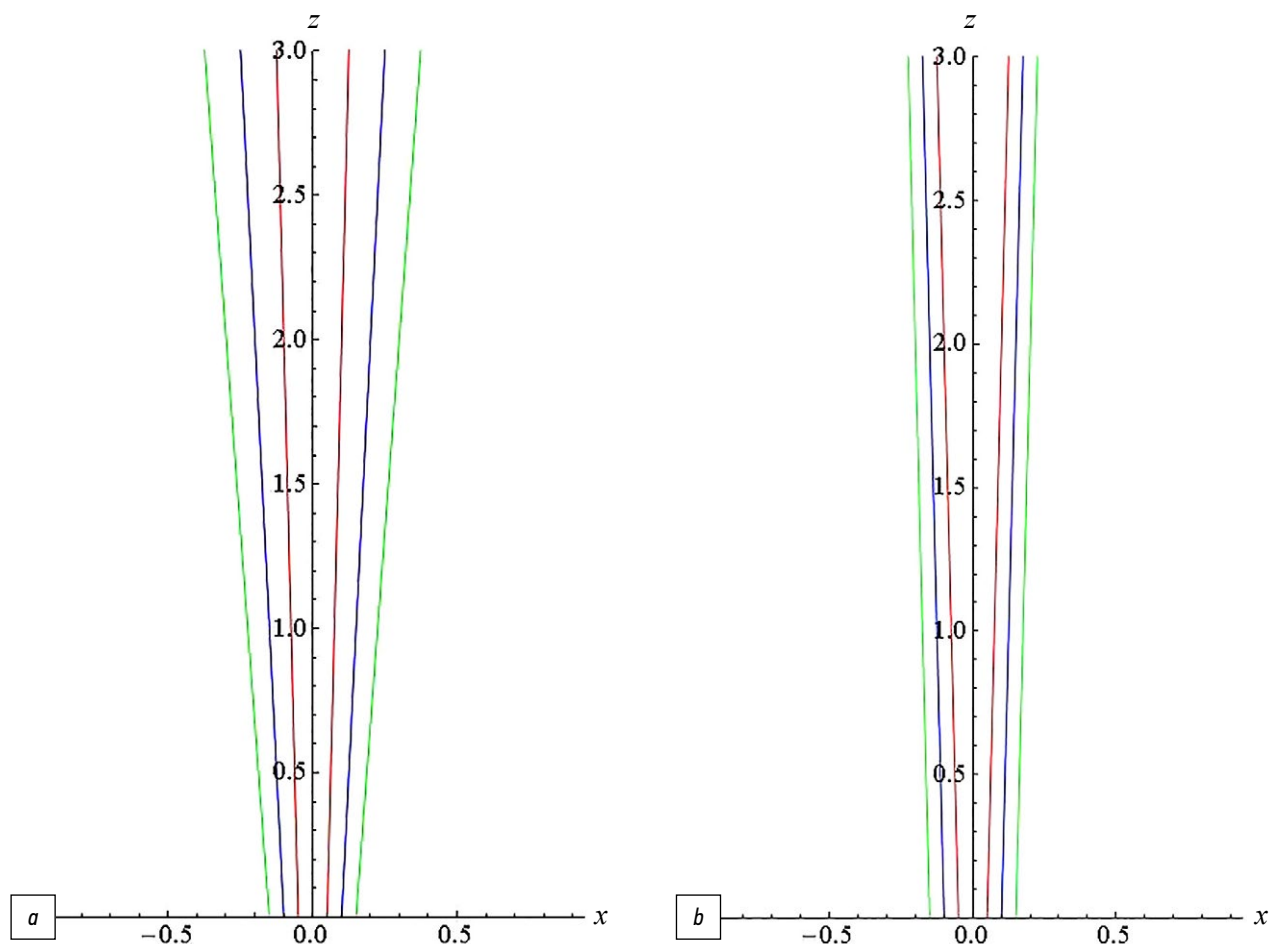
Для частиц порошка были выбраны параметры, типичные для стали, а газ-носитель представлен аргоном. Результаты расчетов показали естественное, с поправкой на силу Стокса, совпадение траекторий частиц с линиями тока газа-носителя. Показана зависимость расходимости пучка частиц от распределения поперечной компоненты скорости газа на выходе из трубочки.

Для понимания возможности дальнейшего обобщения используемого подхода на систему трубочек необходимо провести сравнения с численными расчетами, а также с некоторыми экспериментальными данными.

Возможно, будет необходимо задействовать аналитическое решение Ландау для уравнения Навье – Стокса [2, 3], а также выйти за рамки приближения Стокса в уравнении движения для частиц. На это косвенно указывает как оцененное выше значение числа Рейнольдса  $Re_{out} = 7 \cdot 10^3$  [8], так и предварительные расчеты, дающие очень слабую зависимость траектории частицы от ее размера.

В конце отметим, что нами уже применялся аналитический подход, связанный с затопленной струей Ландау [9, 10], позволивший качественно описать плазменный факел при лазерной сварке с глубоким проплавлением.

Однако, возвращаясь к оценкам числа Рейнольдса и учитывая ограниченность пространства, добавим, что количественное описание рассматриваемых процессов, скорее всего, возможно только при использовании стохастических уравнений гидродинамики [1, 11, 12].



**Рис. 2.** Траектории частиц порошка, вылетающих из трубочки: *a* — разные начальные значения поперечной компоненты  $\tilde{x}_1$  и соответствующие скорости; *b* — разные начальные значения поперечной компоненты  $\tilde{x}_1$  и одинаковые начальные скорости.

**Fig. 2.** Powder trajectories for particles ejected from a tube. *a*, different initial values of the transverse component  $\tilde{x}_1$  and corresponding velocities; *b*, different initial values of the transverse component  $\tilde{x}_1$  and the same initial velocities.

## ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ИНФОРМАЦИЯ

**Вклад авторов.** Все авторы внесли существенный вклад в разработку концепции, разработку физической и математической модели и подготовку статьи, прочли и одобрили финальную версию перед публикацией.

**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.

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

## ADDITIONAL INFORMATION

**Author contributions:** All authors made substantial contributions to the conceptualization, calculation of a physical and mathematical model, and manuscript preparation and reviewed and approved the final version prior to publication.

**Funding sources:** No funding.

**Disclosure of interests:** The authors have no relationships, activities, or interests for the last three years related to for-profit or not-for-profit third parties whose interests may be affected by the content of the article.

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

**Provenance and peer review:** This paper was submitted unsolicited and reviewed following the standard procedure. The peer review process involved one reviewer, a member of the editorial board, and the in-house scientific editor.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Stankevich S., Larionov N., Valdaytseva E. Numerical Analysis of Particle Trajectories in a Gas-Powder Jet during the Laser-Based Directed Energy Deposition Process // *Metals*. 2021. Vol. 11, № 12. 2002. doi: 10.3390/met11122002 EDN: TKNWCS
2. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Теоретическая физика: в 10 т. Т. 6: Гидродинамика. М.: Физматлит, 2021.
3. Броман Г.И., Руденко О.В. Затопленная струя Ландау: точные решения, их смысл и приложения // *Успехи физических наук*. 2010. Т. 180, № 1. С. 97. doi: 10.3367/UFNr.0180.201001f.0097 EDN: LKFJRH
4. Артышев С.Г. Обобщение решения Ландау о затопленной струе // *Теоретическая и математическая физика*. 2016. Т. 186. № 2. С. 181–190. doi: 10.1134/S0040577916020021 EDN: VQORPV
5. Гродзовский Г.Л. О движении мелких частиц в газовом потоке // *Ученые записки ЦАГИ*. 1974. Т. 5, № 2. С. 80–89.
6. Бусройд Р. Течение газа со взвешенными частицами. М.: Мир, 1975.
7. Жежерин Р.П., Кузнецов Ю.Е., Чернов Ю.П. Некоторые примеры точного решения задачи о движении мелкой частицы в газовом потоке // *Ученые записки ЦАГИ*. 1979. Т. 10, № 5. С. 109–112.
8. Dmitrenko A.V. Determination of critical Reynolds number in the jet based on the theory of stochastic equations and equivalence of measures // *J. Phys. Conf. Ser.* 2020. Vol. 1705. doi: 10.1088/1742-6596/1705/1/012015 EDN: QIGGQL
9. Туричин Г.А., Григорьев А.М., Земляков Е.В. и др. Особенности формирования плазменного факела при гибридной лазерно-дуговой сварке // *Теплофизика высоких температур*. 2006. Т. 44, № 5. С. 655–663. doi: 10.1007/s10740-006-0079-y EDN: HVJWBJ
10. Дудолодав С.О., Ларионов Н.В. Условие применения интеграла Крокко при математическом описании плазменного факела при лазерной сварке // *Научно-технические ведомости СПбГПУ. Физико-математические науки*. 2021. Т. 14, № 3. С. 63–78. doi: 10.18721/JPM.14305 EDN: BYXAYI
11. Dmitrenko A.V. Stochastic Equations of Hydrodynamic Theory of Plasma // *Fluids*. 2024. Vol. 9, № 6. doi: 10.3390/fluids9060139 EDN: UAHDWF
12. Dmitrenko A.V., Selivanov A.S. An estimation of the velocity profile for the laminar-turbulent transition in the plane jet on the basis of the theory of stochastic equations and equivalence of measures // *Adv. Aerodyn.* 2022. Vol. 4, № 40. doi: 10.1186/s42774-022-00130-0 EDN: WYKADK

## REFERENCES

1. Stankevich S, Larionov N, Valdaytseva E. Numerical Analysis of Particle Trajectories in a Gas-Powder Jet during the Laser-Based Directed Energy Deposition Process. *Metals*. 2021. Vol. 11, № 12. 2002. doi: 10.3390/met11122002 EDN: TKNWCS
2. Landau LD, Lifshits EM. *Theoretical Physics: in 10 vols. Vol. 6: Hydrodynamics*. Moscow: Fizmatlit; 2021. (In Russ.)
3. Broman GI, Rudenko OV. Submerged Landau jet: exact solutions, their meaning and applications. *Physics-Uspekh*. 2010;180(1):97. doi: 10.3367/UFNr.0180.201001f.0097 EDN: LKFJRH
4. Artyshev S.G. Generalization of Landau's solution on a submerged jet. *Theoretical and Mathematical Physics*. 2016;186(2):181–190. doi: 10.1134/S0040577916020021 EDN: VQORPV
5. Grodzovsky GL. On the movement of small particles in a gas flow. *Uchenye zapiski TsAGI*. 1974;5(2):80–89.
6. Busroyd R. *Gas flow with suspended particles*. Moscow: Mir; 1975. (In Russ.)
7. Zhezherin RP, Kuznetsov YuE, Chernov YuP. Some examples of the exact solution of the problem of the motion of a small particle in a gas flow. *Uchenye zapiski TsAGI*. 1979;10(5):109–112.
8. Dmitrenko AV. Determination of critical Reynolds number in the jet based on the theory of stochastic equations and equivalence of measures. *J. Phys. Conf. Ser.* 2020;1705. doi: 10.1088/1742-6596/1705/1/012015 EDN: QIGGQL
9. Turichin G.A., Grigoriev A.M., Zemlyakov E.V. et al. Features of plasma torch formation in hybrid laser-arc welding. *High Temperature Thermal Physics*. 2006;44(5):655–663. doi: 10.1007/s10740-006-0079-y EDN: HVJWBJ
10. Dudoladov SO, Larionov NV. Condition for application of the Crocco integral in the mathematical description of a plasma torch in laser welding. *Nauchno-tekhnicheskie ведомosti SPbGPU. Fiziko-matematicheskie nauki*. 2021;14(3):63–78. (In Russ.) doi: 10.18721/JPM.14305 EDN: BYXAYI
11. Dmitrenko AV. Stochastic Equations of Hydrodynamic Theory of Plasma. *Fluids*. 2024;9(6). doi: 10.3390/fluids9060139 EDN: UAHDWF
12. Dmitrenko AV, Selivanov AS. An estimation of the velocity profile for the laminar-turbulent transition in the plane jet on the basis of the theory of stochastic equations and equivalence of measures. *Adv. Aerodyn.* 2022;4(40). doi: 10.1186/s42774-022-00130-0 EDN: WYKADK

## ОБ АВТОРАХ

\* **Мукин Дмитрий Вячеславович**,  
специалист, Институт лазерных и сварочных  
технологий, Санкт-Петербургский государственный  
морской технический университет;  
адрес: 198262, Санкт-Петербург, пр. Маршала Жукова, 38-а;  
eLibrary SPIN: 7660-7455;  
e-mail: mukin@ilwt.smtu.ru

**Ларионов Николай Владимирович**,  
канд. физ.-мат. наук, доцент, заведующий кафедрой физики,  
Санкт-Петербургский государственный морской  
технический университет;  
eLibrary SPIN: 7181-9757;  
e-mail: larionov.nickolay@gmail.com

## AUTHORS' INFO

\* **Dmitriy V. Mukin**,  
specialist, Institute of laser and welding technologies,  
Saint Petersburg State Marine Technical University;  
address: 38-a Marshala Zhukova Ave,  
Saint Petersburg, Russia, 198262;  
eLibrary SPIN: 7660-7455;  
e-mail: mukin@ilwt.smtu.ru

**Nukolay V. Larionov**,  
Cand. Sci. (Physics and Mathematics), Assistant Professor,  
Head of the Department of Physics, Saint Petersburg State Marine  
Technical University;  
eLibrary SPIN: 7181-9757;  
e-mail: larionov.nickolay@gmail.com

**Молчановский Василий Максимович,**

ассистент, кафедра физики, Санкт-Петербургский  
государственный морской технический университет;  
eLibrary SPIN: 2618-9594;  
e-mail: molchanovskiy@gmail.com

**Юдин Илья Николаевич,**

специалист, Институт лазерных и сварочных технологий,  
Санкт-Петербургский государственный морской  
технический университет;  
eLibrary SPIN: 3877-3528;  
e-mail: youdin@ilwt.smtu.ru

**Vasiliy M. Molchanovsky,**

assistant, Department of Physics, Saint Petersburg  
State Marine Technical University;  
eLibrary SPIN: 2618-9594;  
e-mail: molchanovskiy@gmail.com

**Ilya N. Udin,**

specialist, Institute of Laser and Welding Technologies,  
Saint Petersburg State Marine Technical University;  
eLibrary SPIN: 3877-3528,  
e-mail: youdin@ilwt.smtu.ru

---

\* Автор, ответственный за переписку / Corresponding author



Оригинальное исследование

УДК 621.373.826

DOI: [https://doi.org/10.52899/24141437\\_2025\\_03\\_355](https://doi.org/10.52899/24141437_2025_03_355)

EDN: KVUPAF

## Влияние газового потока на образцы, изготовленные методом селективного лазерного сплавления

З. Мианджи<sup>1,2</sup>, А.Ю. Кобицкий<sup>1</sup>, В.В. Черноволов<sup>1</sup>, Р.М. Жуков<sup>1</sup>, Д.Н. Тужилин<sup>1</sup>, Е.В. Раевский<sup>1</sup><sup>1</sup> НПЦ «Лазеры и аппаратура ТМ», Москва, Россия;<sup>2</sup> Национальный исследовательский университет Московский институт электронной техники, Москва, Россия

### АННОТАЦИЯ

**Актуальность.** Селективное лазерное сплавление (СЛС) — это технология изготовления металлических деталей путем сплавления частиц металлических порошковых композиций с помощью лазерного излучения. СЛС обеспечивает отличные механические свойства изготовленных деталей и высокую свободу в процессе их проектирования. В данной статье авторы изучают влияние мощности лазерного излучения на процесс разбрызгивания расплавленного порошкового материала. В ходе исследования были проанализированы причины возникновения, внешний вид и состав разбрызгивания, а также методы борьбы с ним.

Поскольку процесс СЛС осуществляется в защитной атмосфере инертного газа, было показано, что поток газа является решающим фактором, так как он удаляет конденсат и предотвращает окисление материала во время плавления. Затвердевшие разбрызгиваемые частицы имеют средний размер приблизительно 162 мкм, что значительно превышает исходный размер порошка, равный 32 мкм.

**Цель работы** состоит в анализе выбросов материалов из порошка нержавеющей стали во время обработки и влияния потока газа на качество образца, особенно с точки зрения пористости.

**Результаты.** Показали, что расход газа значительно влияет на однородность свойств изготавливаемых изделий. Свойства изготавливаемых деталей изменялись в зависимости от расположения образцов на платформе. Характеристики изготовленных деталей были более высокими при размещении образцов в зонах с высокой скоростью потока газа, при размещении в зонах с низкой скоростью потока газа их качество снижалось.

**Заключение.** Полученные результаты могут быть использованы для прогнозирования и диагностики качества деталей, изготовленных в процессе СЛС.

**Ключевые слова:** селективное лазерное сплавление; пористость; скорость потока; разбрызгивание; ламинаризатор.

### Как цитировать

Мианджи З., Кобицкий А.Ю., Черноволов В.В., Жуков Р.М., Тужилин Д.Н., Раевский Е.В. Влияние газового потока на образцы, изготовленные методом селективного лазерного сплавления // Труды Санкт-Петербургского государственного морского технического университета. 2025. Т. 4, № 3. С. 355–364. DOI: [10.52899/24141437\\_2025\\_03\\_355](https://doi.org/10.52899/24141437_2025_03_355) EDN: KVUPAF

Original Study Article

DOI: [https://doi.org/10.52899/24141437\\_2025\\_03\\_355](https://doi.org/10.52899/24141437_2025_03_355)

EDN: KVUPAF

# Effect of Gas Flow on Samples Produced by Selective Laser Melting

Zahra Mianji<sup>1,2</sup>, Alexey Yu. Kobitsky<sup>1</sup>, Vladimir V. Chernovolov<sup>1</sup>, Roman M. Zhukov<sup>1</sup>, Dmitry N. Tuzhilin<sup>1</sup>, Evgeny V. Rayevsky<sup>1</sup>

<sup>1</sup> NPTS Lasers and Equipment TM, Moscow, Russia;

<sup>2</sup> National Research University of Electronic Technology, Moscow, Russia

## ABSTRACT

**BACKGROUND:** Selective laser melting (SLM) is a technology for manufacturing metal parts by melting particles of metal powder compositions using laser radiation. SLM provides excellent mechanical properties of manufactured parts and large discretion of design. The paper studies the effect of laser power on the spattering of molten powder. The study analyzed the causes, appearance, and composition of spatter and methods to prevent it.

The SLM is performed in shielding inert gas; thus, it has been shown that the gas flow is a decisive factor as it removes condensate and prevents oxidation of the material during melting. The solidified spatter has an average size of approximately 162  $\mu\text{m}$ , which is significantly larger than the initial powder size of 32  $\mu\text{m}$ .

**AIM:** To analyze the spatter of stainless steel powder during processing and the effect of gas flow on sample quality, especially its porosity.

**RESULTS:** The study showed that gas flow rate significantly affects the uniformity of the properties of manufactured products. The properties of the manufactured parts varied based on the location of the samples on the platform. The quality of the manufactured parts was higher when placed in areas with high gas flow rate and lower when placed in areas with low gas flow rate.

**CONCLUSION:** The study may be used to predict and test the quality of parts manufactured using the SLM.

**Keywords:** selective laser melting; porosity; flow rate; spatter; laminarizer.

## To cite this article

Mianji Z, Kobitsky AY, Chernovolov VV, Zhukov RM, Tuzhilin DN, Rayevsky EV. Effect of Gas Flow on Samples Produced by Selective Laser Melting. *Transactions of the Saint Petersburg State Marine Technical University*. 2025;4(3):355–364. DOI: 10.52899/24141437\_2025\_03\_355 EDN: KVUPAF

## ВВЕДЕНИЕ

В процессе селективного лазерного сплавления (СЛС) поверхность материала расплавляется, и иногда материал превращается в плазму, что способствует дополнительно поглощению лазерного излучения [1].

Во время процесса изготовления детали через рабочую камеру постоянно циркулирует защитный газ, удаляя образующиеся при плавлении продукты горения и выброшенные из ванны расплава металлические частицы.

Явление разбрызгивания обычно наблюдается при лазерной обработке в различных производственных процессах, таких как лазерное сверление, резка, сварка, а также в селективном лазерном сплавлении.

В указанных процессах происходит выброс расплавленного материала из ванны расплава с последующим затвердеванием и возможным осаждением на близлежащие участки или удалением с помощью потока газа. Было установлено, что эффекты Марангони в ванне расплава в сочетании с давлением отдачи, возникающим при расширении паров металла, являются основными факторами, ответственными за выброс расплавленного материала [2].

Сила отдачи преодолевает поверхностное натяжение, которое противодействует сжимающему эффекту этой силы, что приводит к образованию углублений и разбрызгиванию материала. При охлаждении ниже температуры кипения поверхностное натяжение начинает преобладать, что приводит к образованию пор в результате разрушения стенок углубления. Эффекты поверхностного натяжения доминируют в переходной области, где наблюдается интенсивное течение расплавленного материала (эффект Марангони). Этот поток способствует охлаждению впадины, образованию зоны денудации, втягиванию соседних частиц и формированию боковых пор вблизи частично расплавленных частиц. В конце концов переходная зона утончается из-за распада потока расплава и образования хвостовой части. Течение в переходной зоне является нерегулярным и длится недолго из-за снижения температуры и последующего затвердевания [3].

Кроме того, сообщалось, что под действием давления газового потока расплавленный металл, изначально имеющий удлиненную форму, распадается на более мелкие капли, что способствует минимизации поверхностной энергии. В качестве альтернативы был разработан гидродинамический анализ в сочетании с моделью однофазного потока, чтобы продемонстрировать, как увлечение микрочастиц потоком окружающего газа на самом деле влияет на выброс брызг по сравнению с давлением отдачи согласно теории паров металла [2, 4].

Воздействие брызг может быть как полезным, так и вредным для свойств детали, что потенциально может привести к ее поломке. Градиенты температуры, возникающие при попадании брызг на более холодную область металла сварного шва, действуют как локализованные источники напряжений, что может способствовать

образованию трещин. Поэтому были предприняты попытки минимизировать или полностью устранить брызги [2].

Толщина порошкового слоя обратно пропорциональна плотности энергии  $\psi$ , т.е.

$$\psi = P/(v \cdot h \cdot t),$$

где  $P$  — мощность лазера,  $v$  — скорость сканирования,  $h$  — пространство для штриховки, а  $t$  — толщина слоя [5]. Разбрызганные частицы были проанализированы с помощью сканирующей электронной микроскопии, и оказалось, что они значительно крупнее исходного порошка. Таким образом, осаждение брызг во время процесса СЛС, безусловно, нарушает равномерность толщины слоя порошкового материала [6].

Также было показано, что увеличение скорости перемещения пучка сфокусированного лазерного излучения по поверхности слоя порошкового материала или уменьшение его мощности снижает количество образующихся брызг. Количество и размеры брызг, выбрасываемых из ванны расплава, были количественно определены и представлены в отчетах после обработки изображений, полученных с помощью высокоскоростных камер. Было также замечено, что брызги оседают на затвердевших слоях расплава. В ходе количественного анализа основное внимание уделялось брызгам, вновь выбрасываемым из расплава и оседающим над слоем порошка, а также анализу порошка до и после процесса СЛС. При этом роль потока инертного газа в переносе брызг и его влияние на их распределение по слою порошка не рассматривались. Детальное распределение брызг порошка может иметь решающее значение, особенно когда на подложку размещается несколько слоев деталей перед началом сборки [2].

С помощью высокоскоростной камеры было зафиксировано и проанализировано взаимодействие лазерного излучения и брызг. Показано, что при сканировании в направлении потока газа брызги с большей вероятностью попадают на траекторию лазерного луча. В результате тепловая энергия лазерного излучения тратится впустую на сжигание этих брызг, что приводит к неполному расплавлению материала и, как следствие, к повышению пористости напечатанных деталей, что неизбежно снижает их прочность [2].

Поскольку для изготовления деталей методом СЛС используется порошок, механизм образования порошковых брызг является более сложным, чем в других лазерных процессах. Это связано с тем, что может образовываться множество брызг, которые могут смешиваться с чистыми порошками, что, в свою очередь, влияет на последующее формирование структуры. Описанная выше исследовательская работа была сосредоточена на процессе образования брызг и их характеристиках. В этой статье рассматриваются методы борьбы с брызгами, образующимися в процессе СЛС с использованием порошка нержавеющей стали, а также анализируется влияние брызг на поверхность и включения в изготовленных деталях.

Выводы, полученные в результате проведенных исследований, могут быть использованы для производства высококачественных деталей методом СЛС за счет контроля интенсивности рассеяния.

## МАТЕРИАЛЫ И ОБОРУДОВАНИЕ

Исследования проводились с использованием порошка нержавеющей стали. Этот материал широко применяется в промышленности благодаря высокой коррозионной стойкости и хорошим прочностным и пластическим свойствам. Выбранный порошок имеет частицы диаметром 10–63 мкм и следующий химический состав, %: Fe — основа; Cr — 12,73; Co — 8,62; Ni — 5,16; Mo — 3,75; Si — 0,12; Mn — 0,09; C — 0,01.

Для проведения исследований использовался комплекс селективного лазерного сплавления МЛ6-3, разработанный в ООО «НПЦ «Лазеры и аппаратура ТМ». Платформа построения комплекса имеет размеры 300×300 мм. Комплекс МЛ6-3 предназначен для опытно-промышленной отработки процесса получения сложнопрофильных металлических деталей (технология СЛС) по заданной модели САД. Лазерное излучение транспортируется с помощью оптической системы. Источником лазерного излучения в комплексе МЛ6-3 является иттербиевый волоконный лазер YLR-500-SM с длиной волны излучения 1070±5 нм производства компании IPG Photonics («ИПЭ-Полюс») в количестве четырех штук (рис. 1).

Управление работой комплекса осуществляется с помощью специализированного технологического программного обеспечения (СПО), которое состоит из нескольких

программных модулей. СПО принимает на вход от программного модуля Slicer подготовленный файл задания, который затем исполняется программой ML69, управляющей комплексом МЛ6-3.

## МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПОРИСТОСТИ ОБРАЗЦОВ

Измерение пористости образцов проводилось с использованием системы анализа изображений «ВидеоТест-Металл 1.2» на фотографиях нетравленной поверхности микрошлифов, полученных на инвертированном оптическом микроскопе CarlZeiss AxioObserver.A1m с использованием системы анализа изображений «ВидеоТест-Структура 5.2». Методика измерения пористости в «ВидеоТест-Металл 1.2» основана на ГОСТ 9391-80. «ВидеоТест-Металл 1.2» позволяет определять пористость материала при увеличениях от ×12,5 до ×1000 в автоматическом режиме. Во встроенной методике определения пористости в «ВидеоТест-Металл 1.2» проведена корректировка выделения пор для более точного определения размеров, площади и объемной доли пор относительно исследованной поверхности.

Микрошлифы исследуемых образцов изготовлены по методике фирмы Struers на шлифовально-полировальном станке Struers LaboPol-5 с использованием оригинальных расходных материалов. Изучение и фотографирование образцов проводились на оптическом микроскопе AxioObserver.A1m с использованием системы анализа изображений «ВидеоТест-Структура 5.2».

## МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ИСПЫТАНИЙ

Испытания на растяжение проводили по ГОСТ 1497-2023 при комнатной температуре на образцах толщиной  $a_0 = 2$  мм, шириной  $b_0 = 4$  мм, с начальной расчетной длиной  $l_0 = 25$  мм (рис. 2).

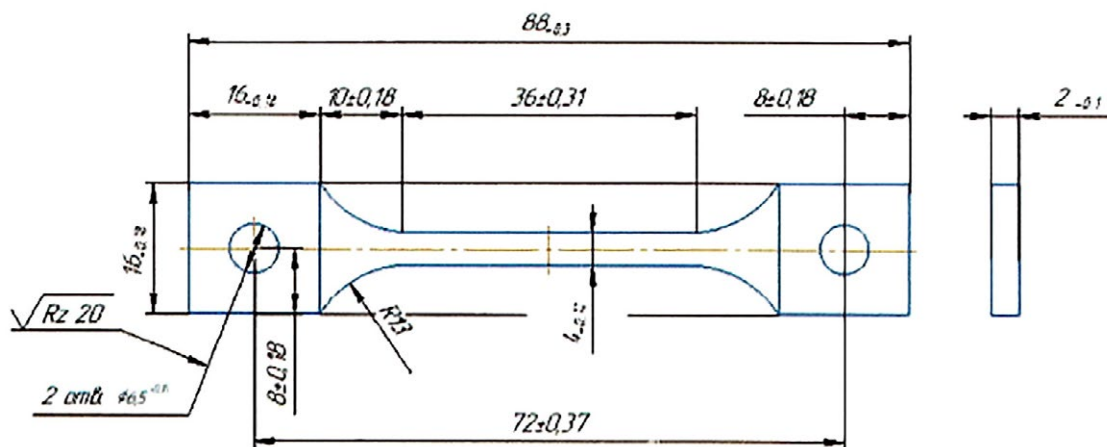
Испытания проводили на установке INSTRON 5989 со скоростью перемещения траверсы  $V_c = 1$  мм/мин при комнатной температуре. Перед испытанием на образцы наносили метки и делали замеры начальной расчетной длины  $l_0$ , а после испытания — конечной расчетной длины  $l_k$ . В процессе испытания с помощью тензометра INSTRON 2620-603 записывалась диаграмма деформирования в координатах «напряжение  $\sigma$  — деформация  $\varepsilon$ ».

## РЕЗУЛЬТАТЫ

Порошинки собирались из зоны всасывания (левая часть рис. 3, а). Морфология разбрызгивающихся частиц была изучена с помощью оптического микроскопа. Как показано на рис. 3, б, разбрызгивающиеся частицы имеют крупные размеры и разнообразные формы. Средний размер исходных порошков и разбрызгиваемых частиц



Рис. 1. Внешний вид МЛ6-3.  
Fig. 1. View of ML6-3.



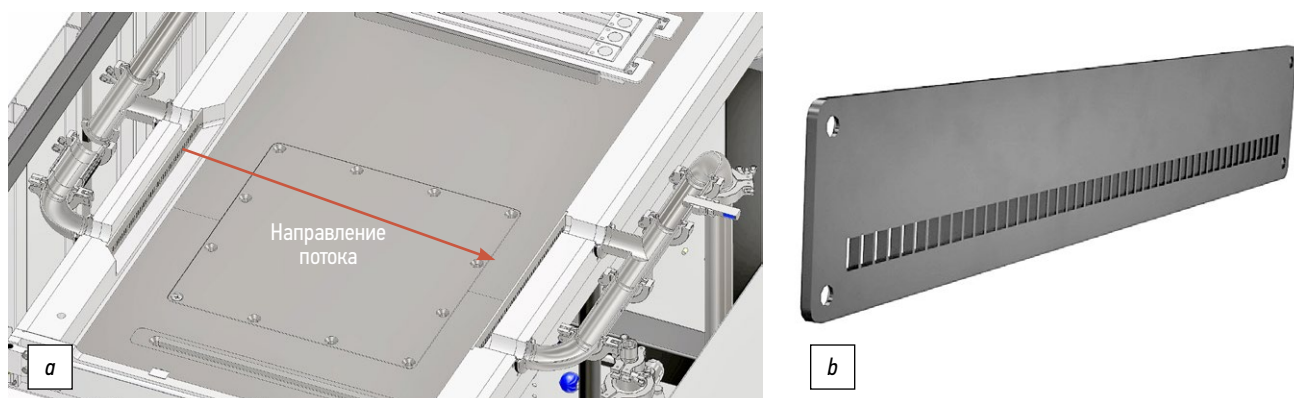
**Рис. 2.** Образец для испытаний на растяжение.  
**Fig. 2.** Tensile test sample.

составлял 50 мкм и 130 мкм соответственно. Низкая концентрация в распределении по размерам в основном объясняется различными источниками разбрызгиваемых частиц. Кроме того, большинство разбрызгиваемых частиц имело сферическую или почти сферическую морфологию.

Как показано на рис. 4, а, поток газа поступает в камеру по двум трубам. Если используется деталь, изображенная на рис. 4, б, то скорость потока газа на разных участках платформы неодинакова и в некоторых местах поток газа полностью отсутствует. В то же время использование



**Рис. 3.** Внешний вид платформы (а) и порошинки после воздействия лазерного излучения, удаленные из ванны расплава (б).  
**Fig. 3.** View of the platform (а) and powder particles removed from the melt bath after exposure to laser radiation (б).



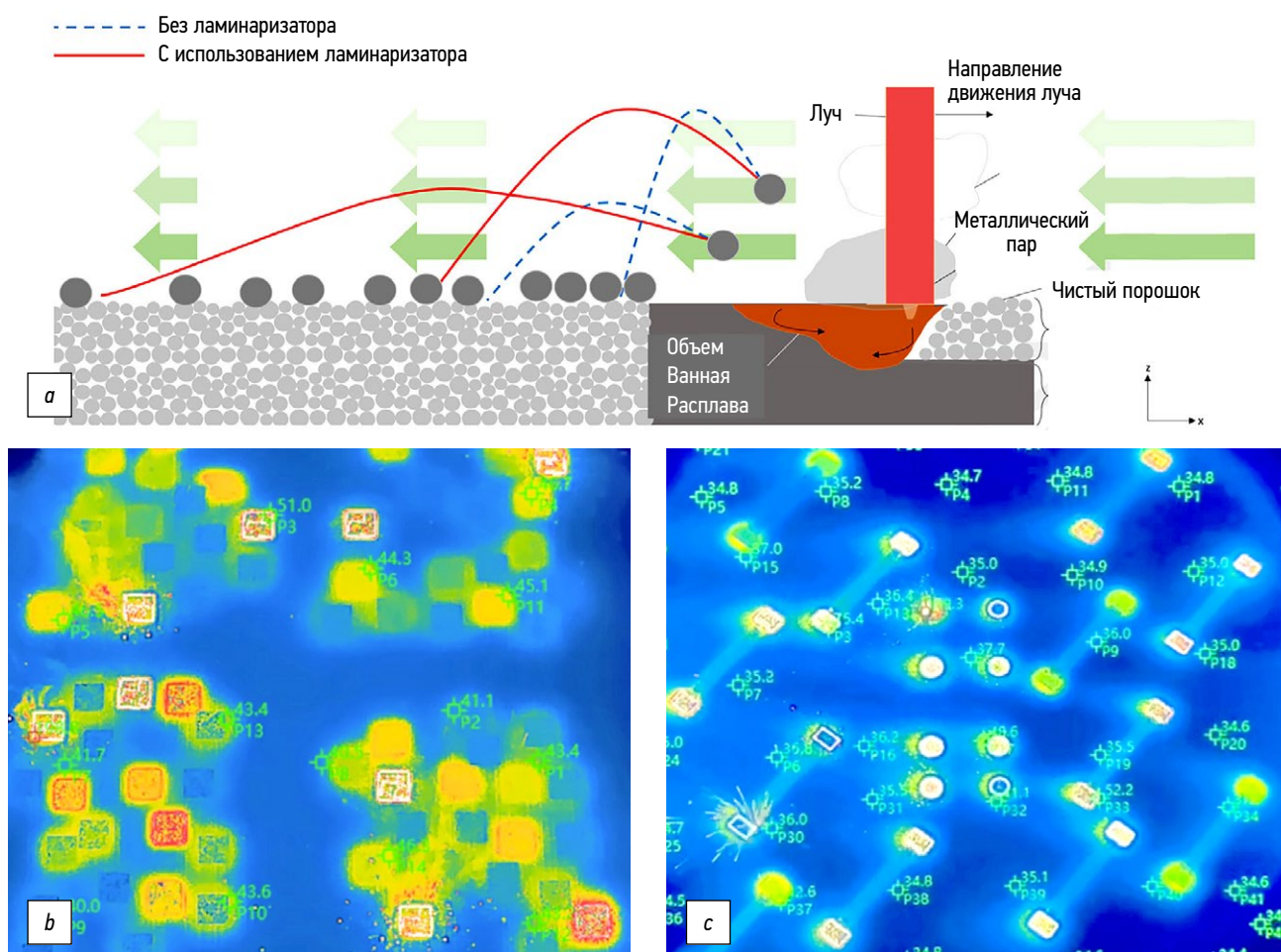
**Рис. 4.** Общий вид платформы и циркуляция газа (а), деталь (б).  
**Fig. 4.** General view of the platform and gas circulation (а); part (б).

ламинаризатора обеспечивает практически равномерное распределение расхода газа по всей поверхности платформы.

На рис. 5, *a* показано, как изменяются траектории частиц в зависимости от наличия газового потока. Например, при одинаковой массе и размере частиц те из них, которые вылетают с высокой скоростью и под большим углом, обладают большей кинетической энергией и, следовательно, достигают большей высоты траектории в отсутствие газового потока. С другой стороны, частицы, выброшенные под меньшими углами, не отклоняются далеко от места сканирования. В статье [7] наблюдалось, что выброшенные частицы обладали достаточным восходящим моментом, чтобы не подвергаться значительному воздействию поперечного потока на начальном этапе своих траекторий. Однако гравитационные силы в конечном итоге вернули бы их обратно вниз, и частицы были бы унесены поперечным потоком инертного газа. В процессе СЛС наличие газового потока способствовало бы дальнейшему перемещению этих частиц вниз по течению в направлении  $-x$ , что делает их распределение в значительной степени зависимым от числа Стокса [8].

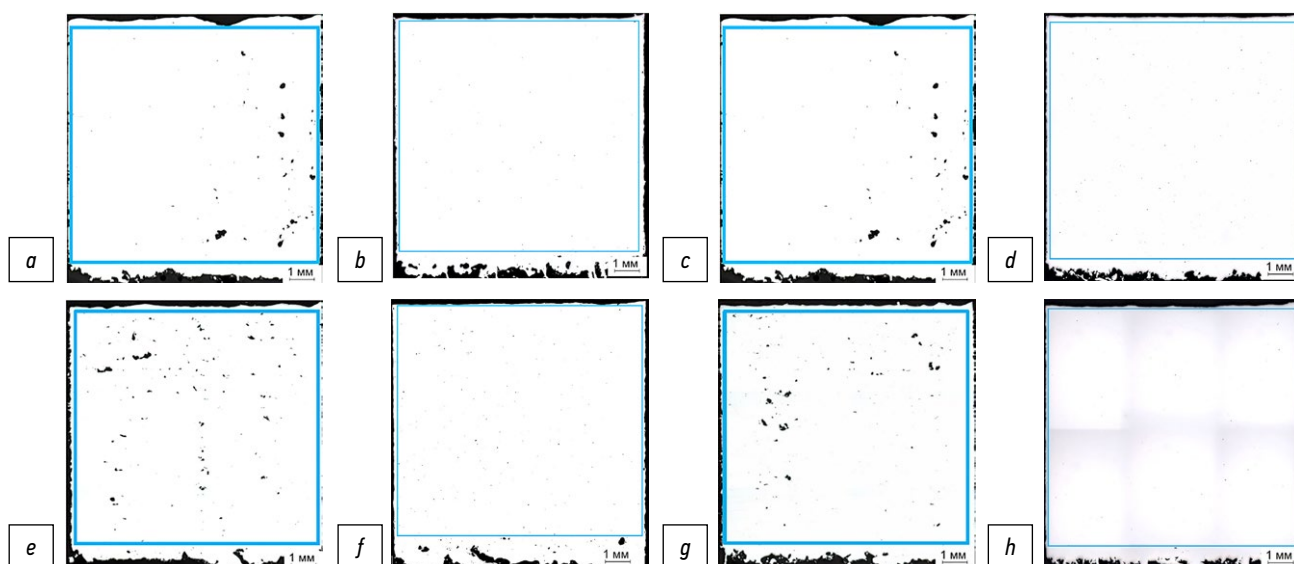
Рис. 5, *b* показывает процесс сгорания частиц без поперечного потока. Рис. 5, *c* иллюстрирует наличие поперечного потока с использованием ламинаризатора при мощности лазерного излучения 200 Вт. Показанные изображения указывают на необходимость согласования поперечного потока с настройками процесса СЛС, поскольку пламя и частицы должны быть эффективно удалены. Еще одно важное наблюдение заключается в том, что выброшенные частицы обладают достаточным восходящим моментом, чтобы изначально не подвергаться влиянию поперечного потока, но при этом отклоняются в сторону при повторном входе в поток после свободного падения.

Выброшенные частицы, находящиеся в производственной зоне, будут использоваться на следующем этапе производственного процесса. Если частицы достаточно малы, они будут расплавлены лазерным источником и использованы в качестве исходного порошка. Однако, если частицы крупные, мощности лазерного излучения недостаточно, чтобы их расплавить. Это приводит к образованию пористости внутри готовых изделий [9].



**Рис. 5.** Схема профилей выброса брызг из ванны расплава и влияние газового потока на траектории (*a*), изображение получено с помощью тепловизора [2]; без ламинаризатора (*b*); с использованием ламинаризатора (*c*).

**Fig. 5.** Diagram of melt bath spatter profiles and the effect of gas flow on the trajectories (*a*). The image was made by a thermal imaging camera [2] without a laminarizer (*b*) and using a laminarizer (*c*).



**Рис. 6.** Определение пористости деталей, лазер № 1: без ламинаризатора (a), с использованием ламинаризатора (b); лазер № 2: без ламинаризатора (c), с использованием ламинаризатора (d); лазер № 3: без ламинаризатора (e), с использованием ламинаризатора (f); лазер № 4: без ламинаризатора (g), с использованием ламинаризатора (h).

**Fig. 6.** Porosity analysis of parts, laser 1: without a laminarizer (a) and using a laminarizer (b); laser 2: without a laminarizer (c) and using a laminarizer (d); laser 3: without a laminarizer (e) and using a laminarizer (f); laser 4: without a laminarizer (g) and using a laminarizer (h).

Когда новый слой порошкового материала разравнивается на поверхности построения, затвердевшие разбрызгиваемые частицы между слоями не могут быть удалены, поэтому они накапливаются и способствуют образованию внутренних дефектов в деталях. Если брызги прилипают к поверхности изготовленных деталей, предварительное нанесение порошка будет заблокировано при распределении следующего слоя порошка. Мелкие брызги полностью расплавляются при лазерном сканировании и, таким образом, металлургически соединяются с деталями. Если размеры затвердевших брызг превышают указанную толщину слоя, то только часть из них расплавляется при лазерном сканировании. Это предотвращает попадание лазерного излучения в области рядом с крупными брызгами, что затрудняет растекание жидкого металла в ванне расплава [10, 11].

Как видно на рис. 6, a, c, e, g, детали, изготовленные без использования ламинаризатора из-за недостаточного расхода газа, покрываются выброшенными из ванны расплава металлическими частицами, которые падают на поверхность чистого порошка в рабочей зоне детали, еще не подвергнутой сплавлению. Это может привести к образованию пор в объеме детали.

В то же время, как показано на рис. 6 b, d, f, h, при использовании ламинаризатора скорость потока газа равномерна по всей платформе. Металлические частицы летят на поверхности в нерабочую зону или частично сплавляются. В результате пористость практически отсутствует.

В результате испытаний были определены механические характеристики: временное сопротивление  $\sigma_s$ , условный предел текучести  $\sigma_{0,2}$ , относительное удлинение после разрыва  $\varepsilon$ .

Проведены испытания на растяжение при комнатной температуре плоских образцов толщиной 2 мм из металлопорошковой стали, полученных методом СЛС на установке МЛ6-3 с четырьмя лазерами на платформе размером 300×300 мм.

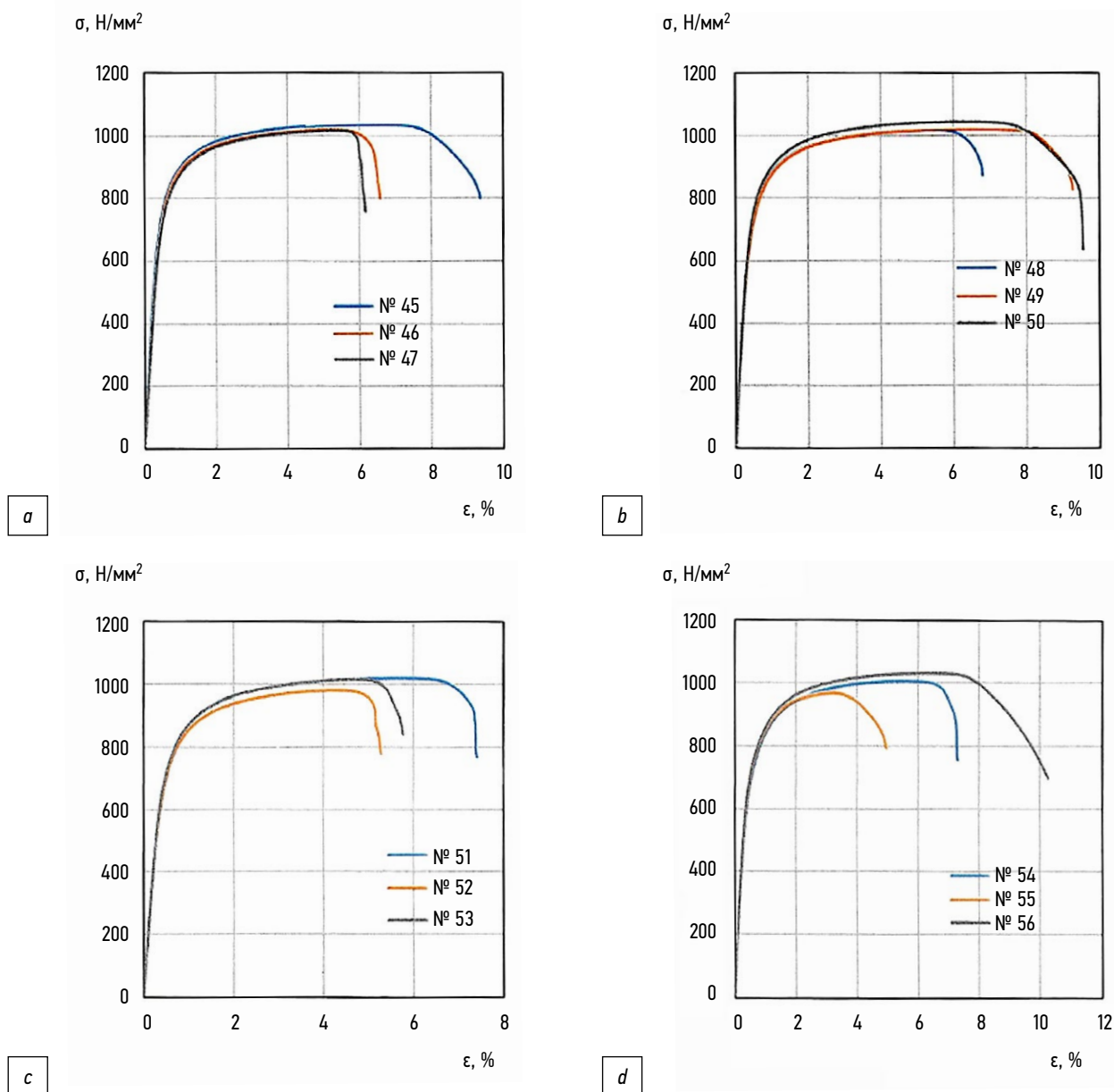
Полученные средние значения физико-механических свойств:  $\sigma_s = 1015 \text{ Н/мм}^2$ ;  $\sigma_{0,2} = 768 \text{ Н/мм}^2$ ;  $\varepsilon = 8,17\%$ . Как видно на рис. 7, результаты испытаний на растяжение по всему поверхностному участку платформы одинаковы при использовании ламинаризатора.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе проведенного исследования процесса селективного лазерного сплавления (СЛС) было проанализировано влияние мощности лазерного излучения и потока защитного газа на выброшенные в виде брызг из ванны расплава металлические частицы. Было показано, что если выброшенные частицы возвращаются обратно на поверхность предназначенного для лазерного сплавления слоя порошкового материала, то это ухудшает качество изготавливаемой детали. Повышение однородности детали может быть обеспечено за счет использования ламинаризатора для улучшения потока газа.

Разбрызгиваемые частицы могут прилипать к поверхности готовых деталей или смешиваться с несплавленным порошком. Это может привести к образованию пор или отверстий внутри деталей.

При использовании нового ламинаризатора результаты испытаний на растяжение по всему поверхностному участку платформы одинаковы.



**Рис. 7.** Диаграммы деформирования при растяжении: лазер № 1 (a); лазер № 2 (b); лазер № 3 (c); лазер № 4 (d).  
**Fig. 7.** Tensile strain diagrams: laser 1 (a); laser 2 (b); laser 3 (c); laser 4 (d).

## ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ИНФОРМАЦИЯ

**Вклад авторов.** Захра Мианджи — поиск публикаций по теме статьи, написание текста рукописи; Алексей Ю. Кобицкий — редактирование текста рукописи; Евгений В. Раевский — редактирование текста рукописи, создание изображений; Владимир В. Черноволов, Роман М. Жуков, Димитрий Н. Тужилин — консультирование при написании 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.

**Благодарности.** Благодарим всех людей, которые помогли в изготовлении МЛБ-3: технологов, разработчиков-конструкторов, электронщиков, программистов, а также сотрудников механического и сборочного производства и всех, кто принимал участие в процессе.

**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 использовались.

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



## ADDITIONAL INFORMATION

**Author contributions:** Zakhra Mianji: investigation, writing—original draft; Alexey Yu. Kobitsky: writing—review & editing; Evgeny V. Raevsky: writing—review & editing, visualization; Vladimir V. Chernovolov, Roman M. Zhukov, Dimitry N. Tuzhilin: writing—advice. All authors approved the version of the manuscript to be published and agree to be accountable for all aspects of the work, ensuring that issues related to the accuracy or integrity of any part of the work are appropriately investigated and resolved.

**Acknowledgments:** We thank all the people who helped us to make ML6-3, including manufacturing engineers, designers, electronics engineers, software developers, employees of mechanical and assembly shops, and everyone who took part in the process.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Bin A., Halimi I., Pham Q. Spatter transport by inert gas flow in selective laser melting: A simulation study // *Powder Technol.* 2019. Vol. 352. P. 103–116. doi: 10.1016/j.powtec.2019.04.044
2. Bin A.A., Pham Q. Study of the spatter distribution on the powder bed during selective laser melting // *Addit. Manuf.* 2018. Vol. 22. P. 86–97. doi: 10.1016/j.addma.2018.04.036
3. Khairallah S.A., Anderson A.T., Rubenchik A., King W.E. Laser powder-bed fusion additive manufacturing: Physics of complex melt flow and formation mechanisms of pores, spatter, and denudation zones // *Acta Materialia.* 2016. Vol. 108. P. 36–45. doi: 10.1016/j.actamat.2016.02.014 EDN: WUOJWR
4. Manyalibo J.M. Metal vapor micro-jet controls material redistribution in laser powder bed fusion additive manufacturing // *Sci. Rep.* 2017. Vol. 7, N. 1. P. 1–12. doi: 10.1038/s41598-017-04237-z
5. Read N., Wang W., Essa Kh., Attallah M.M. Selective laser melting of AlSi10Mg alloy: Process optimisation and mechanical properties development // *Mater. Des.* 2015. Vol. 65. P. 417–424. doi: 10.1016/j.matdes.2014.09.044
6. Wang D., Wu Sh., Fu F., et al. Mechanism and characteristics of spatter generation in SLM processing and its effect on the properties // *Mater. Des.* 2016. Vol. 117. P. 121–130. doi: 10.1016/j.matdes.2016.12.060

## REFERENCES

1. Bin A, Halimi I, Pham Q. Spatter transport by inert gas flow in selective laser melting: A simulation study. *Powder Technol.* 2019;352:103–116. doi: 10.1016/j.powtec.2019.04.044
2. Bin AA, Pham Q. Study of the spatter distribution on the powder bed during selective laser melting. *Addit. Manuf.* 2018;22:86–97. doi: 10.1016/j.addma.2018.04.036
3. Khairallah SA, Anderson AT, Rubenchik A, King WE. Laser powder-bed fusion additive manufacturing: Physics of complex melt flow and formation mechanisms of pores, spatter, and denudation zones. *Acta Materialia.* 2016;108:36–45. doi: 10.1016/j.actamat.2016.02.014 EDN: WUOJWR
4. Manyalibo JM. Metal vapor micro-jet controls material redistribution in laser powder bed fusion additive manufacturing. *Sci. Rep.* 2017;7(1):1–12. doi: 10.1038/s41598-017-04237-z
5. Read N, Wang W, Essa Kh, Attallah MM. Selective laser melting of AlSi10Mg alloy: Process optimisation and mechanical properties development. *Mater. Des.* 2015;65:417–424. doi: 10.1016/j.matdes.2014.09.044

**Funding sources:** No funding.

**Disclosure of interests:** The authors have no relationships, activities, or interests for the last three years related to for-profit or not-for-profit third parties whose interests may be affected by the content of the article.

**Statement of originality:** No previously obtained or published material (text, images, or data) was used in this study or article.

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

**Provenance and peer review:** This paper was submitted unsolicited and reviewed following the standard procedure. The peer review process involved one reviewer, a member of the editorial board, and the in-house scientific editor.

7. Low D.K.Y., Li L., Corfe A.G. Effects of assist gas on the physical characteristics of spatter during laser percussion drilling of NIMONIC 263 alloy // *Appl. Surf. Sci.* 2000. Vol. 154–155. P. 689–695. doi: 10.1016/S0169-4332(99)00427-4 EDN: JIEYTI
8. Bidare P., Bitharas I., Ward R.M., et al. Fluid and particle dynamics in laser powder bed fusion // *Acta Mater.* 2018. Vol. 142. P. 107–120. doi: 10.1016/j.actamat.2017.09.051
9. Wang T., Dai Sh., Liao H., Zhu H. Pores and the formation mechanisms of SLMed AlSi10Mg // *Rapid Prototyping Journal.* 2020. Vol. 26, N. 9. P. 1657–1664. doi: 10.1108/rpj-02-2020-0036 EDN: GOQBNP
10. Nguyen D.S., Park H.S., Lee C.M. Effect of cleaning gas stream on products in selective laser melting // *Mater. Manuf. Process.* 2018. Vol. 34, № 4. P. 364–370. doi: 10.1080/10426914.2018.1512132
11. Pal S., Drstvenšek I., Brajljeh T. Physical behaviors of materials in selective laser melting process // *Strojniški vestnik — Journal of Mechanical Engineering.* 2018. Vol. 64, № 12. P. 695–707. doi: 10.2507/daaam.scibook.2018.21

6. Wang D, Wu Sh, Fu F, et al. Mechanism and characteristics of spatter generation in SLM processing and its effect on the properties. *Mater. Des.* 2016;117:121–130. doi: 10.1016/j.matdes.2016.12.060
7. Low DKY, Li L, Corfe AG. Effects of assist gas on the physical characteristics of spatter during laser percussion drilling of NIMONIC 263 alloy. *Appl. Surf. Sci.* 2000;154–155:689–695. doi: 10.1016/S0169-4332(99)00427-4 EDN: JIEYTI
8. Bidare P, Bitharas I, Ward RM, et al. Fluid and particle dynamics in laser powder bed fusion. *Acta Mater.* 2018;142:107–120. doi: 10.1016/j.actamat.2017.09.051
9. Wang T, Dai Sh, Liao H, Zhu H. Pores and the formation mechanisms of SLMed AlSi10Mg. *Rapid Prototyping Journal.* 2020;26(9):1657–1664. doi: 10.1108/rpj-02-2020-0036 EDN: GOQBNP
10. Nguyen DS, Park HS, Lee CM. Effect of cleaning gas stream on products in selective laser melting. *Mater. Manuf. Process.* 2018;34(4):364–370. doi: 10.1080/10426914.2018.1512132
11. Pal S, Drstvenšek I, Brajljeh T. Physical behaviors of materials in selective laser melting process. *Strojniški vestnik — Journal of Mechanical Engineering.* 2018;64(12):695–707. doi: 10.2507/daaam.scibook.2018.21

**ОБ АВТОРАХ****\* Мианджи Захра,**

канд. техн. наук, ведущий инженер технолог,  
ООО НПЦ «Лазеры и аппаратура ТМ»;  
адрес: Россия, 124498, Зеленоград, проезд 4922-й, д. 4, стр. 4,  
Технопарк ЭЛМА;  
eLibrary SPIN: 3908-8005;  
e-mail: mianji@bk.ru

**Кобицкий Алексей Юрьевич,**

руководитель направления Аддитивные Технологии,  
ООО НПЦ «Лазеры и аппаратура ТМ»;  
e-mail: ayuk@laser-app.ru

**Черновол Владимир Владимирович,**

главный конструктор, ООО НПЦ «Лазеры и аппаратура ТМ»;  
e-mail: chvv@laser-app.ru

**Жуков Роман Михайлович,**

инженер конструктор, ООО НПЦ «Лазеры и аппаратура ТМ»;  
e-mail: zhrm@laser-app.ru

**Тужилин Дмитрий Николаевич,**

заместитель по науке, ООО НПЦ «Лазеры и аппаратура ТМ»;  
e-mail: tuzhilin@laser-app.ru

**Раевский Евгений Валентинович,**

канд. техн. наук, доцент, главный конструктор,  
ООО НПЦ «Лазеры и аппаратура ТМ»;  
eLibrary SPIN: 3372-1767;  
e-mail: evr@laser-app.ru

**AUTHORS' INFO****\* Zahra Mianji,**

Cand. Sci. (Engineering), Senior Technical Engineer,  
NPTS Lasers and Equipment TM LLC;  
address: 4 passage 4922, Zelenograd, Moscow,  
124498, Russia;  
eLibrary SPIN: 3908-8005;  
e-mail: mianji@bk.ru

**Alexey Yu. Kobitsky,**

Head of Additive Technologies, NPTS Lasers  
and Equipment TM LLC;  
e-mail: ayuk@laser-app.ru

**Vladimir V. Chernovolov,**

Chief Designer, NPTS Lasers and Equipment TM LLC;  
e-mail: chvv@laser-app.ru

**Roman M. Zhukov,**

Academic Degree, Academic Title, Designer Engineer,  
NPTS Lasers and Equipment TM LLC;  
e-mail: zhrm@laser-app.ru

**Dmitry N. Tuzhilin,**

Deputy General Director, NPTS Lasers and Equipment TM LLC;  
e-mail: tuzhilin@laser-app.ru

**Evgeny V. Rayevsky,**

Cand. Sci. (Engineering), Associate Professor, Chief Designer,  
NPTS Lasers and Equipment TM LLC;  
eLibrary SPIN: 3372-1767;  
e-mail: evr@laser-app.ru

---

\* Автор, ответственный за переписку / Corresponding author

Оригинальное исследование

УДК 621.9.015

DOI: [https://doi.org/10.52899/24141437\\_2025\\_03\\_365](https://doi.org/10.52899/24141437_2025_03_365)

EDN: JHFUPK

# Разработка технологии перфорации жаровых труб, покрытых термозащитным покрытием

Я.П. Мигдалев<sup>1,2</sup>, Е.В. Раевский<sup>1</sup><sup>1</sup> Научно-производственный центр «Лазеры и аппаратура ТМ», Москва, Россия;<sup>2</sup> Московский государственный университет геодезии и картографии, Москва, Россия

## АННОТАЦИЯ

**Актуальность.** Современные газотурбинные двигатели требуют повышения рабочей температуры для увеличения эффективности, что приводит к экстремальным термическим нагрузкам на материалы. Температура продуктов сгорания в авиадвигателях может превышать точки плавления используемых жаропрочных сплавов, что ограничивает их применение. Для защиты рабочих деталей применяются термозащитные покрытия и системы охлаждения с использованием перфорационных отверстий. Технология лазерной перфорации является перспективным методом, обеспечивающим высокую точность и экономическую эффективность при изготовлении отверстий в жаровых трубах с термозащитным покрытием. Разработка и оптимизация таких технологий актуальны для авиационно-космической отрасли и общего машиностроения, где требуется баланс между качеством, производительностью и стоимостью.

**Цель работы** — разработка рационального технического решения для лазерной перфорации жаровых труб с нанесенным термозащитным покрытием, обеспечивающего оптимальное сочетание точности, качества поверхности и производительности. Работа направлена на анализ существующих методов перфорации, их сравнение и обоснование выбора оптимальной технологии.

**Материалы и методы.** В работе проведен технический анализ существующих решений перфорации как на примере авиационно-космических, так и общепромышленных применений. Рассмотрены варианты выполнения перфорации жаровых труб по имеющимся в открытых источниках данным. Экспериментальная часть включала использование серийной установки пятикоординатной лазерной обработки СЛП1520 с волоконным лазером.

**Результаты.** Анализ показал, что лазерная перфорация превосходит альтернативные методы по точности и скорости обработки. Оптимальные параметры лазерного излучения обеспечивают минимальное термическое воздействие на термозащитное покрытие и высокую воспроизводимость. Эксперименты выявили, что использование длиннофокусного объектива обеспечивает стабильность диаметра и формы отверстий, а нанесение защитной пасты с нитридом бора позволяет исключить появление выплесков вокруг отверстий.

**Заключение.** Лазерная перфорация является эффективным решением для изготовления охлаждающих отверстий в жаровых трубах с термозащитным покрытием. Предложенная технология обеспечивает высокую точность, качество и воспроизводимость, что делает ее предпочтительной для авиационно-космических применений. Дальнейшие исследования могут быть направлены на изучение влияния защитной пасты на величину измененного слоя.

**Ключевые слова:** жаровая труба; термозащитное покрытие; лазер; сверление; перфорация.

## Как цитировать

Мигдалев Я.П., Раевский Е.В. Разработка технологии перфорации жаровых труб, покрытых термозащитным покрытием // Труды Санкт-Петербургского государственного морского технического университета. 2025. Т. 4, № 3. С. 365–373. DOI: 10.52899/24141437\_2025\_03\_365 EDN: JHFUPK

Original Study Article

DOI: [https://doi.org/10.52899/24141437\\_2025\\_03\\_365](https://doi.org/10.52899/24141437_2025_03_365)

EDN: JHFUPK

# Development of Punching Technology for Combustion Liners with Thermal Control Coatings

Yakov P. Migdalev<sup>1,2</sup>, Eugene V. Raevskiy<sup>1</sup><sup>1</sup> Research and Production Center "Lasers and equipment TM", Moscow, Russia;<sup>2</sup> Moscow State University of Geodesy and Cartography, Moscow, Russia

## ABSTRACT

**BACKGROUND:** The efficiency of a contemporary gas turbine engines can be improved by increasing the operating temperature inside the engine, resulting in extreme thermal stress on materials. The temperature of combustion products inside aircraft engines can reach temperatures exceeding the melting points of the alloys used, limiting their applications. To protect working parts, thermal control coatings and cooling systems with punch holes are used. Laser perforation is a promising method that provides high precision and cost-effectiveness of hole punching processes for combustion liners with thermal control coatings. The development and improvement of such technologies is relevant for the aerospace industry and general mechanical engineering, where a balance between quality, performance, and cost is required.

**AIM:** To develop an efficient laser perforation solution for combustion liners with thermal control coating, providing an optimal combination of precision, surface quality, and performance. The paper analyzes and compares existing punching methods to support the choice of the best possible technology.

**METHODS:** The paper provides a technical analysis of existing perforation solutions for aerospace and general industrial applications. Punching options for combustion liners are considered based on data from open sources. The experimental part included the use of a serial five-axis laser processing machine SLP520 with a fiber laser.

**RESULTS:** Analysis showed that laser perforation outperforms alternative methods in terms of accuracy and processing speed. Optimal laser radiation parameters ensure the lowest thermal effect on the thermal control coating and high repeatability. Experiments showed that a long-focus lens ensures fixed diameter and shape of the holes and a boron nitride protective paste helps prevent splashes around the holes.

**CONCLUSION:** Laser perforation is an effective punching solution for cooling holes in combustion liners with thermal control coating. The proposed technology provides high precision, quality, and repeatability, making it preferable for aerospace applications. Further research may be aimed at studying the effect of protective paste on the thickness of the modified layer.

**Keywords:** combustion liner; thermal control coating; laser; drilling; perforation.

## To cite this article

Migdalev YaP, Raevskiy EV. Development of Punching Technology for Combustion Liners with Thermal Control Coatings. *Transactions of the Saint Petersburg State Marine Technical University*. 2025;4(3):365–373. DOI: 10.52899/24141437\_2025\_03\_365 EDN: JHFUPK

## ВВЕДЕНИЕ

Актуальность разработки технологии перфорации жаровых труб, покрытых ТЗП, определяется, в том числе, восстановлением самолетостроения для гражданской авиации в РФ. К примеру, на сегодняшний день Минпромторгом РФ в рамках комплексной программы развития авиационной отрасли заявляется, что по итогам выполнения программы к 2031 году будет выпущено 994 гражданских самолета.

Одной из задач данной программы является производство отечественных комплектующих, в том числе авиационных двигателей. С учетом успешной реализации программ импортозамещения и подготовки серийного производства акционерным обществом «Объединенная двигателестроительная корпорация» предусмотрено до 2030 года производство 4964 единиц двигателей в обеспечение серийного выпуска самолетов и вертолетов отечественного производства [1].

При производстве современных газотурбинных двигателей необходимо изготавливать большое количество охлаждающих отверстий в различных деталях двигателя, в том числе в жаровых трубах, изготовленных из жаропрочных сплавов на основе никеля и покрытых ТЗП.

Лазерное сверление является хорошо зарекомендовавшей себя технологией обработки различных деталей в авиационных двигателях благодаря возможностям обработки широкого спектра материалов (в т.ч. диэлектриков и композитных материалов), высокой производительности процесса, минимальному тепловложению и возможностям обработки деталей под разными углами.

К охлаждающим отверстиям в компонентах авиационных двигателей предъявляются повышенные технические требования: отсутствие трещин, малые значения шероховатости и измененного слоя, отсутствие выплесков и наплывов со стороны входа и выхода, а также малые овальность и конусность.

Большинство предыдущих исследований по сверлению жаропрочных сплавов на основе никеля, как с нанесенным ТЗП, так и без, направлены на изучение влияния на качество получаемых отверстий типов лазерных источников и их параметров, таких как частота и длительность импульсов, средняя и пиковая мощность, плотность мощности и т.д.

R. Bathe и G. Padmanabham в [2] было проведено исследование сверления отверстий в In718, покрытом ТЗП, Nd:YAG лазером и выявлено влияние длительности импульса и плотности мощности на диаметр и конусность отверстий. Увеличение плотности мощности и длительности импульса приводит к увеличению диаметра отверстий и уменьшению конусности, но при этом к появлению микротрещин как в ТЗП, так и металле.

S. Marimuthu и др. в [3], а также M. Naеem в [4] показали преимущества непрерывных и квазинепрерывных (QCW) волоконных лазеров по сравнению с Nd:YAG

лазерами при сверлении отверстий в жаропрочных сплавах на основе никеля. Преимуществами являются: скорость сверления отверстий, качество получаемых отверстий, в частности, меньший измененный слой, почти полное отсутствие микротрещин и отслоения ТЗП.

Xiaomaо Sun и др. в работе [5] провели экспериментальные исследования тепловых эффектов при сверлении In718 с ТЗП пикосекундным лазером. Согласно результатам экспериментов, при достижении необходимой пороговой энергии импульса, частота повторения импульсов является наиболее важным фактором, влияющим на накопление тепла, при сверлении пикосекундным лазером.

Changlong Zheng и др. (см. [6]) на основе экспериментальных данных, а также термомеханической модели классифицируют и описывают механизм появления и поведения трещин при скоростном сверлении пикосекундным лазером. Согласно результатам расчетов и экспериментов, предпочтительной оказывается стратегия сверления с использованием низкой частоты повторения импульсов для улучшения качества отверстий.

Sezer H.K. и др. в [7] исследовали влияние угла наклона луча на величину зоны термического влияния и поведение ТЗП при лазерном сверлении. Было установлено, что при уменьшении угла к поверхности образца увеличивается зона термического влияния, а также увеличивается размер трещин в ТЗП.

McNally и др. в своем исследовании [8] отмечают важность и преимущества лазерного сверления деталей авиационных двигателей, в том числе покрытых ТЗП.

Во всех приведенных исследованиях изучалось лазерное сверление отверстий в жаропрочных сплавах на никелевой основе с нанесенным ТЗП и без него, воздействие лазерным излучением осуществлялось со стороны металла с покрытием.

В настоящей работе проведены экспериментальные исследования для изучения возможности лазерного сверления жаропрочных сталей на никелевой основе с нанесенным термозащитным покрытием, с воздействием лазерного излучения со стороны металла без покрытия.

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ РАБОТА

### Материал и экспериментальная установка

Лазерное сверление отверстий, расположенных под углами 40°, 60°, 75° и 90° к нормали поверхности, выполнялось в образцах из жаропрочной стали марки ХН50ВМТЮБ (ЭП648-ВИ). На внутренней поверхности нанесено термозащитное покрытие  $ZrO_2+7\%Y_2O_3$  с подслоем ПНХ20К20Ю. При обработке часть образцов была покрыта пастой нитрида бора со стороны ТЗП.

Эксперименты по сверлению проводились на серийной установке пятикоординатной лазерной обработки СЛП520 (рис. 1). Лазерная установка предназначена для сварки,

резки и перфорации деталей сложной формы. Комплекс разработан для задач авиационного двигателестроения, с учетом требований к высокой точности и качеству обработки деталей.

Установка оснащена емкостным датчиком для автоматического управления фокусом, а также системой машинного зрения, которая позволяет распознавать профиль обрабатываемой поверхности для базирования относительно реперных точек и базовых поверхностей.

При проведении экспериментов был использован волоконный лазер. Излучение передавалось по оптоволокну диаметром 50 мкм до коллиматора с фокусным расстоянием 100 мм. Фокусирующие линзы использовались с фокусным расстоянием 64 мм и 145 мм. Рассчитанные по формуле (1) из [9] диаметры сфокусированного излучения составили 32 мкм и 73 мкм соответственно.

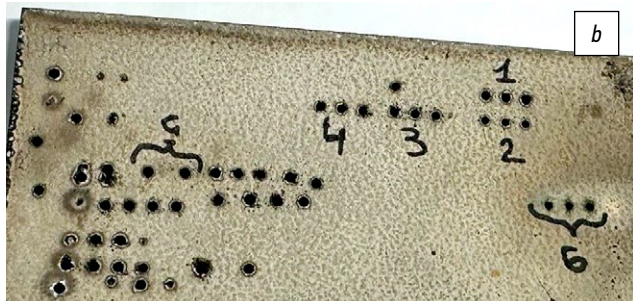
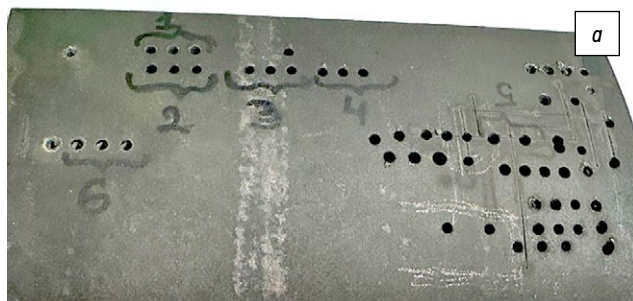
$$d = 2 \left( \omega_1 \cdot \frac{f_2}{f_1} \right) \quad (1)$$

где  $\omega_1$  — радиус излучения на выходе из волокна,  $f_1$  — фокусное расстояние коллиматора,  $f_2$  — фокусное расстояние объектива.

Отверстия изготавливались на плоских образцах. В каждом ряду выполнялось несколько отверстий с одинаковыми параметрами с использованием одной стратегии обработки. После проведения лабораторных исследований были определены оптимальные параметры и выполнена обработка объемного имитатора жаровой трубы.

### Металлографический анализ отверстий

При подготовке образцов соблюдалась особая осторожность, поскольку термозащитное покрытие очень хрупкое. Образец зажимался таким образом, чтобы режущий диск проходил сначала через термозащитное покрытие, для минимизации его повреждений. Затем образцы запрессовывались в бакелит, после чего шлифовались с последовательным уменьшением зернистости шлифовальной бумаги и финишной полировкой алмазной пастой. Чтобы выявить измененный слой, образцы были протравлены.



**Рис. 2.** Общий вид отверстий: *a* — вид со стороны входа лазерного излучения; *b* — вид со стороны выхода лазерного излучения.  
**Fig. 2.** General view of the holes: *a*, view from the laser input side; *b*, view from the laser output side.



**Рис. 1.** Серийная установка пятикоординатной лазерной обработки СЛП520.

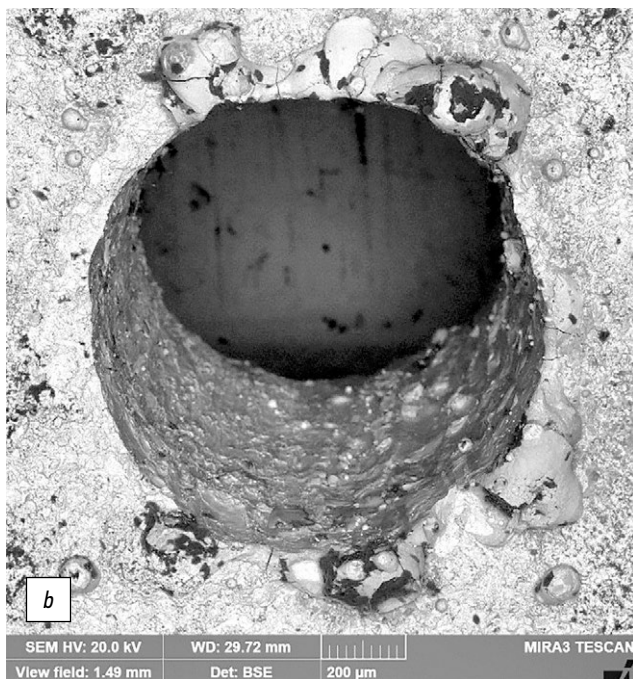
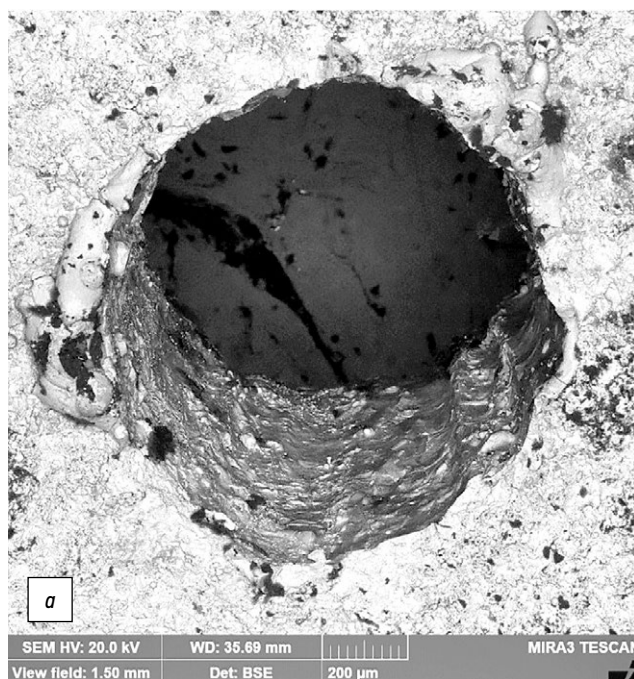
**Fig. 1.** Serial three-axis laser processing machine SLP 520.

Для определения наличия выплесков и наплывов вокруг отверстий, наличия сколов и отслоения термозащитного покрытия, а также измерения измененного слоя и микротрещин был проведен осмотр поверхности полученных отверстий на электронном микроскопе TESCAN MIRA3 LMN. Количественная оценка измененного слоя проводилась путем измерения в восьми равноудаленных точках вдоль передней и задней кромок отверстий. Были проанализированы все отверстия, полученные на каждом режиме сверления. В результатах приведено максимальное значение измененного слоя.

## РЕЗУЛЬТАТЫ

### Серия 1

В ходе первой серии эксперимента было просверлено шесть матриц отверстий на разных режимах обработки



**Рис. 3.** Выплески, вид со стороны выхода: *a* — режим № 3; *b* — режим № 4.  
**Fig. 3.** Splashes, view from the output: *a*, mode 3; *b*, mode 4.

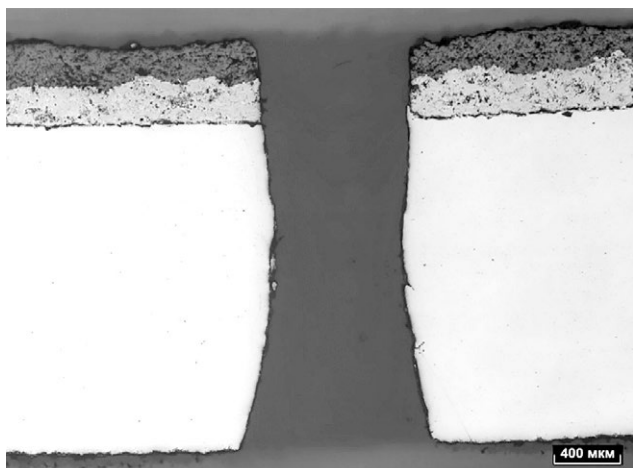
с использованием объектива с фокусным расстоянием 64 мм. Общий вид отверстий приведен на рис. 2. Осмотр поверхности, проведенный на электронном микроскопе, показал, что сколов термозащитного покрытия вблизи отверстий не имеется.

Микроанализ, проведенный на микрошлифах, приготовленных вдоль отверстий, показал, что:

- Фактическая толщина образца с учетом ТЗП составляет от 2,53 до 2,61 мм.
- Фактический угол выполнения отверстий к поверхности образца составляет 90°.
- Все отверстия сквозные, берега отверстий ровные, без волнистости. На режимах № 3 и № 4 по берегам отверстий имеются выплески (рис. 3).
- Диаметр отверстий не стабильный, меняется по глубине отверстия и имеет форму песочных часов: на входе в отверстие больше, на выходе меньше, в середине отверстия самый минимальный диаметр (рис. 4).
- В измененном слое и в материале образца трещин не выявлено.
- Отслаиваний/повреждений ТЗП по границе с основным материалом в процессе сверления не имеется. Результаты микроанализа приведены в табл. 1.

## Серия 2

В ходе второй серии эксперимента было выполнено сверление двух образцов с использованием объектива с фокусным расстоянием 145 мм. Один из образцов был покрыт пастой с нитридом бора для оценки влияния антипригарного покрытия



**Рис. 4.** Форма песочных часов.  
**Fig. 4.** Hourglass shape.

**Таблица 1.** Результаты микроанализа отверстий, полученных в ходе первой серии эксперимента

**Table 1.** Microscopic analysis of holes punched during the first series of experiments

Номер режима	Высота выплесков, мкм	Глубина измененного слоя по берегам отверстий, мкм
1	-	26
2	-	33
3	до 120	27
4	до 106	31
5	-	29
6	-	65

на высоту выплесков. Было просверлено по восемь матриц отверстий на каждом образце, используя одинаковые технологические режимы, но при различной стратегии сверления. Четные ряды — трепанирование, нечетные — по офсетной стратегии. Общий вид образцов приведен на рис. 5, 6.

Осмотр поверхности образцов, проведенный на электронном микроскопе TESCAN MIRA3 LMH, показал, что сколов термозащитного покрытия вблизи отверстий не имеется. На поверхности образцов со стороны выхода лазерного излучения, преимущественно на образце без защитной пасты с нитридом бора, вокруг отверстий имеются выплески и наплывы.

Микроанализ, проведенный на микрошлифах, приготовленных вдоль отверстий, показал, что:

Фактическая толщина образцов с учетом ТЗП составляет от 2,6 до 2,7 мм.

Фактический угол выполнения отверстий к поверхности образца составляет  $90^\circ$ ,  $75^\circ$ ,  $60^\circ$ ,  $40^\circ$ .

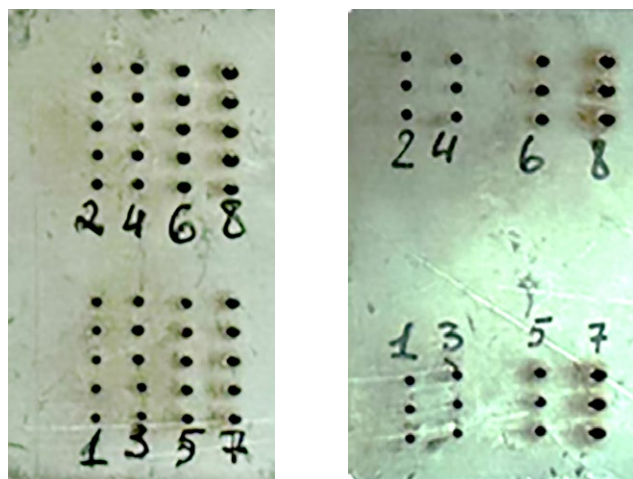
Все отверстия сквозные, берега отверстий ровные, без волнистости, следов от врезания луча лазера на всех исследованных образцах не имеется.

Диаметр отверстий стабильный, форму песочных часов не имеет (рис. 7).

В измененном слое и в материале образца трещин не выявлено.

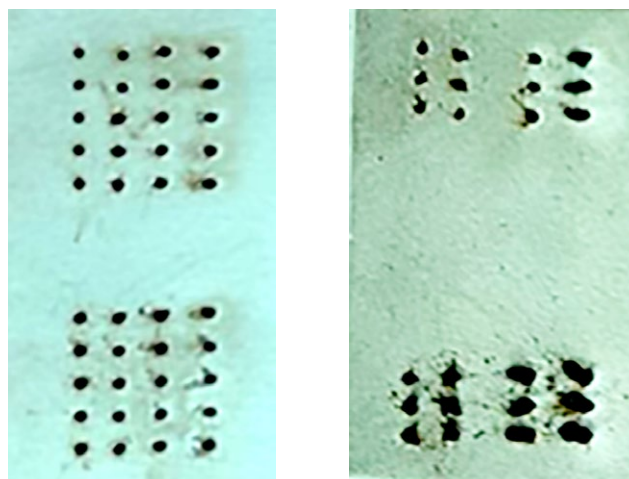
Отслаиваний/повреждений ТЗП по границе с основным материалом в процессе сверления не имеется.

Результаты микроанализа образцов приведены в табл. 2 и 3.



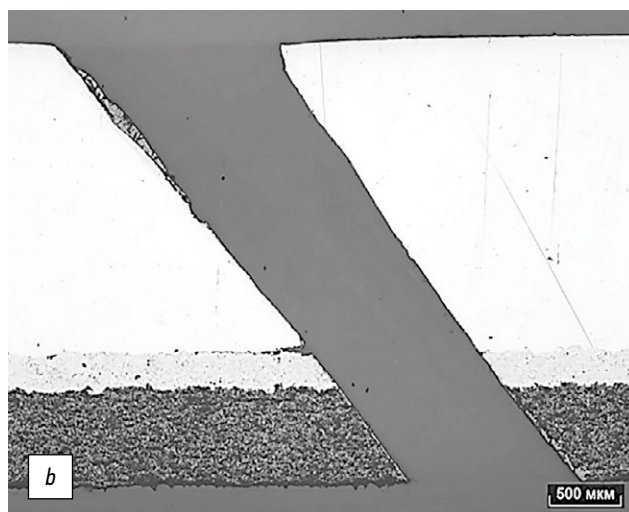
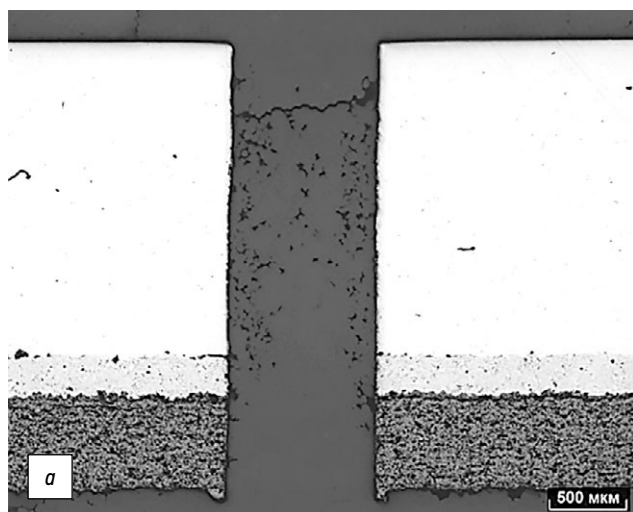
**Рис. 5.** Общий вид отверстий со стороны входа лазерного излучения: *a* — образец, покрытый пастой; *b* — образец без пасты.

**Fig. 5.** General view of the holes from the laser input side: *a*, sample covered with paste; *b*, sample without paste.



**Рис. 6.** Общий вид отверстий со стороны выхода лазерного излучения: *a* — образец, покрытый пастой; *b* — образец без пасты.

**Fig. 6.** General view of the holes from the laser output side: *a*, sample covered with paste; *b*, sample without paste.



**Рис. 7.** Микрошлифы отверстий: *a* —  $90^\circ$  к поверхности; *b* —  $40^\circ$  к поверхности.

**Fig. 7.** Microsections of holes: *a*, at  $90^\circ$  to the surface; *b*, at  $40^\circ$  to the surface.



**Таблица 2.** Результаты микроанализа на образце с пастой

**Table 2.** Microscopic analysis of a sample with paste

Номер матрицы	Угол наклона к поверхности, °	Высота выплесков, мкм	Глубина измененного слоя, мкм
1	90	22	25
2	90	45	55
3	75	–	31
4	75	–	63
5	60	34	28
6	60	–	67
7	40	–	30
8	40	–	76

**Таблица 3.** Результаты микроанализа на образце без пасты

**Table 3.** Microscopic analysis of a sample without paste

Номер матрицы	Угол наклона к поверхности, °	Высота выплесков, мкм	Глубина измененного слоя, мкм
1	90	–	20
2	90	–	23
3	75	–	28
4	75	105	31
5	60	73	30
6	60	173	68
7	40	84	29
8	40	238	74

## ВЫВОДЫ

Экспериментальные исследования проводились для изучения лазерного сверления отверстий в жаропрочном сплаве на основе никеля с нанесенным термозащитным покрытием при воздействии лазерного излучения со стороны металла без покрытия. Результаты представлены с соответствующими иллюстрациями.

В ходе выполнения исследований были получены следующие важные результаты:

1. Для сверления ровных и стабильных по форме и диаметру отверстий необходимо использовать объектив с фокусным расстоянием 145 мм.

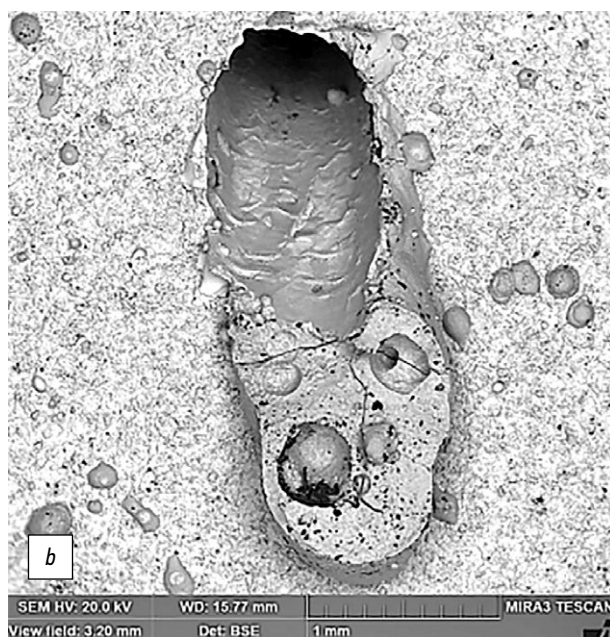
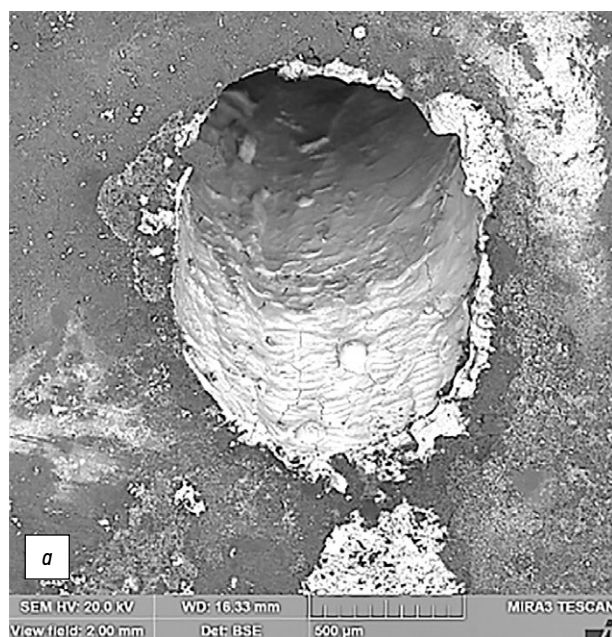
2. При сверлении образцов с воздействием лазерного излучения со стороны металла без покрытия сколов и отслоений ТЗП не наблюдается.

3. Нанесение защитной пасты с нитридом бора позволяет почти исключить появление выплесков вокруг отверстий, но при этом прослеживается увеличение глубины измененного слоя в сравнении с образцом без пасты, что требует дополнительных исследований.

4. Сверление по оффсетной стратегии позволяет получать меньшую глубину измененного слоя и меньшую высоту выплесков в случае сверления образца без пасты.

5. При уменьшении угла наклона к поверхности обрабатываемой поверхности глубина измененного слоя увеличивается незначительно.

Таким образом, лазерное сверление может быть успешно использовано для перфорации отверстий в жаровых трубах с нанесенным на внутренней поверхности термозащитным покрытием. Необходимы дальнейшие экспериментальные



**Рис. 8.** Сравнение качества отверстий, просверленных под углом 40° к поверхности. Вид со стороны выхода лазерного излучения: *a* — образец, покрытый пастой; *b* — образец без пасты.

**Fig. 8.** Qualitative comparison of holes drilled at 40° to the surface. View from the laser output side: *a*, sample covered with paste; *b*, sample without paste.

исследования на скорректированных, с учетом полученных результатов, технологических режимах, с целью исключения появления выплесков и минимизации глубины измененного слоя и исследования влияния защитной пасты с нитридом бора на величину измененного слоя.

## ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ИНФОРМАЦИЯ

**Вклад авторов.** Я.П. Мигдалев — поиск публикаций по теме статьи, получение и обработка экспериментальных данных, написание рукописи, редактирование текста рукописи, создание изображений; Е.В. Раевский — редактирование 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.

**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 рецензент, член редакционной коллегии и научный редактор издания.

## ADDITIONAL INFORMATION

**Author contributions:** Ya.P. Migdalev: investigation, formal analysis, writing—original draft, writing—review & editing, visualization; E.V. Raevsky: writing—review & editing, expert review, validation. All authors approved the version of the manuscript to be published and agree to be accountable for all aspects of the work, ensuring that issues related to the accuracy or integrity of any part of the work are appropriately investigated and resolved.

**Funding sources:** No funding.

**Disclosure of interests:** The authors have no relationships, activities, or interests for the last three years related to for-profit or not-for-profit third parties whose interests may be affected by the content of the article.

**Statement of originality:** No previously obtained or published material (text, images, or data) was used in this study or article.

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

**Provenance and peer review:** This paper was submitted unsolicited and reviewed following the standard procedure. The peer review process involved one reviewer, a member of the editorial board, and the in-house scientific editor.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Комплексная программа развития транспортной отрасли Российской Федерации до 2030 года. Правительство России. 2022. [internet]. Дата обращения: 27.06.2022. Режим доступа: <http://government.ru/docs/45834/>
2. Bathe R., Padmanabham G. Evaluation of laser drilling of holes in thermal barrier coated superalloys // *Materials Science and Technology*. 2014. Vol. 30, N. 14. P. 1778–1782. doi: 10.1179/1743284713Y.0000000477
3. Marimuthu S., Antar M., Dunleavy J., et al. An experimental study on quasi-CW fibre laser drilling of nickel superalloy // *Optics & Laser Technology*. 2017. Vol. 94. P. 119–127. doi: 10.1016/j.optlastec.2017.03.021
4. Naeem M. Advances in drilling with fiber lasers. In: *Industrial Laser Applications Symposium (ILAS 2015)*. SPIE, 2015. Vol. 9657. C. 24–33. doi: 10.1117/12.2182662
5. Sun X., Dong X., Wang K., et al. Experimental investigation on thermal effects in picosecond laser drilling of thermal barrier coated

In718 // *Optics & Laser Technology*. 2019. Vol. 113. P. 150–158. doi: 10.1016/j.optlastec.2018.12.020 EDN: BVJAXF

6. Zheng C., Shen H., Yao Z., et al. Crack behavior in ultrafast laser drilling of thermal barrier coated nickel superalloy // *Journal of Materials Processing Technology*. 2020. Vol. 282. doi: 10.1016/j.jmatprotec.2020.116678 EDN: XA00BT
7. Sezer H.K., Li L., Schmidt M., et al. Effect of beam angle on HAZ, recast and oxide layer characteristics in laser drilling of TBC nickel superalloys // *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. 2006. Vol. 46, N. 15. P. 1972–1982. doi: 10.1016/j.ijmactools.2006.01.010
8. McNally C.A., Folkes J., Pashby I.R. Laser drilling of cooling holes in aeroengines: state of the art and future challenges // *Materials Science and Technology*. 2004. Vol. 20, N. 7. P. 805–813. doi: 10.1179/026708304225017391
9. Тарасов Л.В. Физика процессов в генераторах когерентного оптического излучения. М.: Радио и связь, 1981.

## REFERENCES

1. Comprehensive program for the development of the transport sector of the Russian Federation until 2030. Government of Russia. 2022. [internet]. Accessed: 27.06.2022. Available from: <http://government.ru/docs/45834/>
2. Bathe R., Padmanabham G. Evaluation of laser drilling of holes in thermal barrier coated superalloys. *Materials Science and Technology*. 2014;30(14):1778–1782. doi: 10.1179/1743284713Y.0000000477
3. Marimuthu S, Antar M, Dunleavy J, et al. An experimental study on quasi-CW fibre laser drilling of nickel superalloy. *Optics & Laser Technology*. 2017;94:119–127. doi: 10.1016/j.optlastec.2017.03.021
4. Naeem M. Advances in drilling with fiber lasers. In: *Industrial Laser Applications Symposium (ILAS 2015)*. SPIE; 2015;9657:24–33. doi: 10.1117/12.2182662
5. Sun X, Dong X, Wang K, et al. Experimental investigation on thermal effects in picosecond laser drilling of thermal barrier coated In718. *Optics &*

*Laser Technology*. 2019;113:150–158. doi: 10.1016/j.optlastec.2018.12.020 EDN: BVJAXF

6. Zheng C, Shen H, Yao Z, et al. Crack behavior in ultrafast laser drilling of thermal barrier coated nickel superalloy. *Journal of Materials Processing Technology*. 2020;282. doi: 10.1016/j.jmatprotec.2020.116678 EDN: XA00BT
7. Sezer HK, Li L, Schmidt M, et al. Effect of beam angle on HAZ, recast and oxide layer characteristics in laser drilling of TBC nickel superalloys. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. 2006;46(15):1972–1982. doi: 10.1016/j.ijmactools.2006.01.010
8. McNally CA, Folkes J, Pashby IR. Laser drilling of cooling holes in aeroengines: state of the art and future challenges. *Materials Science and Technology*. 2004;20(7):805–813. doi: 10.1179/026708304225017391
9. Tarasov LV. *Physics of processes in generators of coherent optical radiation*. Moscow: Radio i svyaz; 1981. (In Russ.)

## ОБ АВТОРАХ

**\* Мигдалев Яков Павлович,**

старший-инженер технолог, зам. руководителя  
технологической лаборатории; ООО НПЦ "Лазеры  
и аппаратура ТМ";

адрес: Россия, 124498, Москва, Зеленоград,

проезд 4922-й, д. 4, стр. 4;

ORCID: 0009-0004-4626-4770;

e-mail: jacob@laser-app.ru

**Раевский Евгений Валентинович,**

канд. техн. наук, главный конструктор;

ООО НПЦ "Лазеры и аппаратура ТМ";

eLibrary SPIN: 3372-1767;

ORCID: 0000-0002-8009-9885;

e-mail: evr@laser-app.ru

## AUTHORS' INFO

**\* Yakov P. Migdalev,**

Senior Process Engineer, Deputy Head of the Process  
Laboratory; Research and Production Center "Lasers  
and equipment TM";

address: 4, Proezd 4922, Zelenograd, Moscow, 124498, Russia;

ORCID: 0009-0004-4626-4770;

e-mail: jacob@laser-app.ru

**Eugene V. Raevsky,**

Cand. Sci. (Engineering), Chief Designer, Research  
and Production Center "Lasers and equipment TM";

eLibrary SPIN: 3372-1767;

ORCID: 0000-0002-8009-9885;

e-mail: evr@laser-app.ru

---

\* Автор, ответственный за переписку / Corresponding author

Оригинальное исследование

УДК 621.791.92

DOI: [https://doi.org/10.52899/24141437\\_2025\\_03\\_375](https://doi.org/10.52899/24141437_2025_03_375)

EDN: GTHNVG

# Конструктивные методы минимизации остаточных напряжений при прямом лазерном выращивании

С.Ю. Иванов

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

## АННОТАЦИЯ

**Актуальность.** Зачастую в процессе изготовления изделий из закаливаемых сплавов методами аддитивного производства происходит их разрушение. Причиной этого является неблагоприятное сочетание металлургических факторов и высокий уровень возникающих напряжений. При изготовлении крупногабаритных промышленных конструкций методом прямого лазерного выращивания невозможно обеспечить получение благоприятного структурно-фазового состава и механических свойств наплавляемого металла вследствие низкой межпроходной температуры и высоких скоростей охлаждения. В таком случае для предотвращения разрушения конструкции необходимо снизить уровень напряжений и деформаций.

**Цель работы** — теоретический анализ эффективности использования методов локального изменения геометрии наплавки, а также локального изменения химического состава, для снижения остаточных напряжений и деформаций наплавки, симулирующих условия получения крупногабаритных конструкций методами прямого лазерного выращивания.

**Методы.** Анализируются наплавки типа стенка из сплава Ti-6Al-4V с двумя вариантами галтелей на торцах: плоскими и вогнутыми. Также рассмотрена наплавка типа стенка без галтелей с градиентным переходом от мягкой прослойки из чистого титана к существенно более прочному сплаву Ti-6Al-4V. Для определения напряжений и деформаций в наплавках была разработана численная модель процесса прямого лазерного выращивания. Последовательно связанные задачи теплопроводности в нестационарной постановке и квазистационарная задача термопластичности были решены методом конечных элементов.

**Результаты.** Добавление плоских галтелей на торцах наплавки оказывают незначительное влияние на величину остаточных напряжений и накопленных пластических деформаций. Вогнутые галтели приводят к существенному снижению пластических деформаций, обеспечивая получение бездефектной наплавки. Наибольшую эффективность показал подход, связанный с добавлением менее прочной, но более пластичной прослойки между жесткой подложкой и наплавкой из более прочного сплава. В этом случае максимальный уровень накопленных пластических деформаций достигается на торцах наплавки в области мягкой прослойки и мало зависит от протяженности прослойки. Более прочная часть наплавки из сплава Ti-6Al-4V практически не претерпевает пластического деформирования.

**Выводы.** Используя методы численного моделирования продемонстрирована возможность существенного снижения остаточных напряжений и пластических деформаций в наплавках, получаемых прямым лазерным выращиванием, за счет использования методов локального изменения геометрии наплавки, а также локального изменения химического состава.

**Ключевые слова:** аддитивное производство; прямое лазерное выращивание; остаточные напряжения; метод конечных элементов; титановые сплавы.

## Как цитировать

Иванов С.Ю. Конструктивные методы минимизации остаточных напряжений при прямом лазерном выращивании // Труды Санкт-Петербургского государственного морского технического университета. 2025. Т. 4, № 3. С. 375–384. DOI: 10.52899/24141437\_2025\_03\_375 EDN: GTHNVG

Original Study Article

DOI: [https://doi.org/10.52899/24141437\\_2025\\_03\\_375](https://doi.org/10.52899/24141437_2025_03_375)

EDN: GTHNVG

# Design Methods Used to Minimize Residual Stresses in Direct Laser Deposition

Sergei Yu. Ivanov

Saint Petersburg State Marine Technical University, Saint Petersburg, Russia

## ABSTRACT

**BACKGROUND:** In the additive manufacturing of hardening alloy products, they are often destroyed. This is caused by an unfavourable combination of metallurgic factors and high processing stresses. When manufacturing large-sized industrial structures by direct laser deposition, it is impossible to ensure a favorable phase structure and mechanical properties of the deposited metal due to the low interpass temperature and high cooling rate. In this case, to prevent structural damage, it is required to reduce stress and deformation.

**AIM:** To empirically analyze the efficiency of local deposit geometry and local chemical composition modification to reduce residual stresses and deposition deformations simulating the manufacturing of large-sized structures by direct laser deposition.

**METHODS:** We analyze wall-type deposits made of Ti-6Al-4V alloy with two types of fillets (flat and concave) on the ends. We also describe a wall-type deposit without fillets with a gradient transition from a soft layer of pure titanium to a significantly stronger Ti-6Al-4V layer. To determine stresses and deformations in deposits, a numerical direct laser deposition model was developed. Interlinked problems of heat conduction in a non-stationary formulation and the quasi-static problem of thermally-induced plasticity were solved by the finite element method.

**RESULTS:** The flat fillets added to the ends of the deposit has little effect on the magnitude of residual stresses and accumulated plastic deformations. Concave fillets significantly reduce plastic deformation, ensuring the manufacturing of defect-free deposits. The most effective approach was to add a less durable but more plastic interlayer between the rigid substrate and the deposit made of a stronger alloy. In this case, the highest level of accumulated plastic deformations is achieved at the ends of the deposit in the soft interlayer region and depends little on the interlayer length. The stronger part of the Ti-6Al-4V deposit has no effective plastic deformation.

**CONCLUSION:** It was demonstrated that numerical modeling using local deposit geometry and chemical composition modifications allow to significantly reduce residual stresses and plastic deformations in deposits manufactured by direct laser deposition.

**Keywords:** additive manufacturing; direct laser deposition; residual stresses; finite element method; titanium alloys.

## To cite this article

Ivanov SYu. Design Methods Used to Minimize Residual Stresses in Direct Laser Deposition. *Transactions of the Saint Petersburg State Marine Technical University*. 2025;4(3):375–384. DOI: [10.52899/24141437\\_2025\\_03\\_375](https://doi.org/10.52899/24141437_2025_03_375) EDN: GTHNVG

Submitted: 03.04.2025

Accepted: 24.06.2025

Published online: 22.09.2025

## ВВЕДЕНИЕ

Частую в процессе изготовления изделий методами прямого лазерного выращивания (ПЛВ) и селективного лазерного плавления (СЛП) происходит их разрушение [1]. Причиной этого является неблагоприятное сочетание металлургических факторов и высокий уровень возникающих напряжений. Стремление к повышению производительности процесса наплавки требует повышения скорости перемещения технологической головки, что приводит к увеличению скорости охлаждения наплавляемого металла. В результате при наплавке закаливаемых материалов, таких как титановые сплавы и высокопрочные стали, пластичность наплавляемого металла может снижаться практически до нуля [1, 2].

Множество работ было посвящено выбору оптимальных технологических параметров процесса, обеспечивающих формирование благоприятного структурно-фазового состава и высоких механических свойств [3, 4]. Предлагаемые подходы к решению данной задачи сводятся к определению оптимальной межпроходной температуры и демонстрируются при изготовлении наплавов небольших габаритов. При изготовлении крупногабаритных промышленных конструкций, когда время наплавки одного прохода может достигать 400 с [5], обеспечить заданный уровень межпроходной температуры невозможно. Отсюда следует простой вывод — если невозможно изменить структурно-фазовый состав наплавляемого металла, то для предотвращения разрушения наплавки необходимо снизить уровень напряжений и деформаций [6–8]. Для снижения временных и остаточных напряжений применяются различные подходы, которые можно разделить на технологические и конструкционные.

Технологический подход к снижению напряжений при АП основан на подборе оптимальной межпроходной температуры и оптимальной последовательности заполнения слоев. Как хорошо известно из сварочной практики, наличие равномерного подогрева свариваемой конструкции приводит к снижению уровня напряжений [9, 10]. Следует отметить, что данный подход применим только для конструкций небольшого размера, которые не успевают существенно охлаждаться в процессе наплавки проходов. Использование предварительного и/или сопутствующего подогрева при наплавке крупногабаритных конструкций сопряжено с большими трудностями и в настоящий момент не применяется. К технологическим подходам можно также отнести методы внешнего механического воздействия за счет высокоскоростного пластического деформирования наплавляемого изделия пневматическими молотами [11] или за счет обкатки роликами [12, 13]. Применение данного способа ограничивается рамными конструкциями небольшой высоты, обладающими высокой жесткостью.

К конструктивным методам снижения напряжений можно отнести:

1. Снижение жесткости подложки.

2. Локальное изменение геометрии наплавляемого изделия.
3. Локальное изменение химического состава наплавки т.е. формирование градиента механических свойств.

Первый подход сопряжен с рядом технологических трудностей. Так, в статье [8] отмечается, что использование гибкой подложки приводит к ее существенному деформированию и, как следствие, перемещению наплавки в процессе изготовления. Для снижения напряжений в наплавляемую конструкцию могут быть добавлены различные плавные переходы в местах концентрации напряжений, поддержки и ребра жесткости. Два последних варианта применимы для снижения остаточных деформаций тонкостенных оболочек [14–16], но не для снижения напряжений. Для снижения напряжений и деформаций при наплавке типа стенка можно к торцам добавить галтели различной геометрии. Другим способом снижения напряжений является использование переходного слоя из менее прочного, но более пластичного, сплава между жесткой подложкой и самой изготавливаемой конструкцией из сплава с низкой пластичностью. Технология ПЛВ позволяет получать заданную величину градиента химического состава и механических свойств непосредственно в процессе изготовления изделия [17].

Целью статьи является теоретический анализ эффективности использования предложенных методов локального изменения геометрии наплавки, а также локального изменения химического состава, для снижения остаточных напряжений и деформаций наплавов, моделирующих условия получения крупногабаритных конструкций методами ПЛВ. Анализируются наплавки типа стенка из сплава Ti-6Al-4V с двумя вариантами галтелей на торцах: плоскими и вогнутыми. Также рассмотрена наплавка типа стенка без галтелей с градиентным переходом от мягкой прослойки из чистого титана к существенно более прочному сплаву Ti-6Al-4V. Применение данных подходов при ПЛВ в условиях низкой межпроходной температуры, моделирующее наплавку реальных промышленных конструкций, в литературе не описано, а затрагиваемая проблематика является актуальной для внедрения технологии ПЛВ высокопрочных сплавов.

## МЕТОДЫ

### 1. Геометрия наплавов

В ранее опубликованной автором статье [8] экспериментально и теоретически проанализировано поле остаточных напряжений и деформаций в наплавке из сплава Ti-6Al-4V размерами 70×3,2×28 мм (длина × толщина × высота), полученной методом ПЛВ в условиях, моделирующих изготовление крупногабаритной конструкции. В настоящей статье исследуется наплавка аналогичной длины и толщины, но удвоенной высоты (см. рис. 1, а), полученная в аналогичных

температурно-временных условиях. Прямое лазерное выращивание стенки осуществлялось на торце пластины толщиной 12 мм из сплава Ti-6Al-4V (рис. 1, *a*). Каждый наплавленный слой включал 1 проход высотой 0,56 мм и шириной 3,2 мм. Технологические параметры процесса ПЛВ были следующими: мощность лазерного излучения 2300 Вт; диаметр пятна 1,5 мм; амплитуда боковых колебаний луча 1,25 мм; скорость перемещения 30 мм/с; расход порошка 24 г/мин; расход газа 25 л/мин. Траектория наплавки образца предполагала выполнение всех проходов в одном направлении. После выполнения каждого прохода наплавка охлаждалась за счет конвекции и теплопроводности до температуры менее 100 °С.

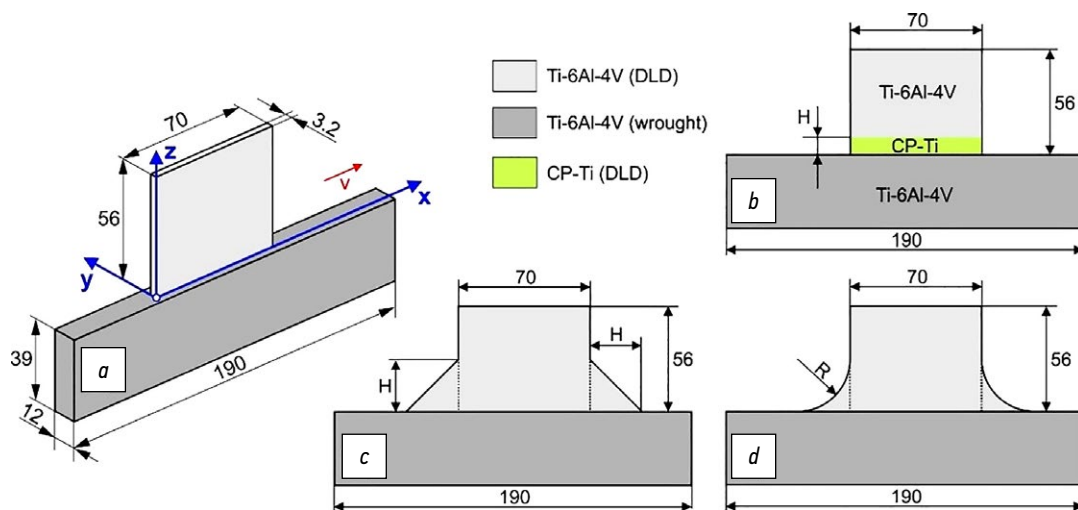
Для минимизации напряжений и деформаций в рассматриваемой наплавке в местах концентрации напряжений на торцах стенки добавлены галтели, как показано на рис. 1, *c, d*. Анализируются следующие варианты галтелей: плоские галтели с катетом 14 и 28 мм (рис. 1, *c*); вогнутые галтели с радиусом 14 и 28 мм (рис. 1, *d*). В качестве альтернативного способа минимизации напряжений предложено выполнять несколько первых слоев, примыкающих к жесткой подложке, из сплава с меньшими прочностными свойствами, например, из технически чистого титана (CP-Ti Grade 2) (см. рис. 1, *b*). Рассматривается два варианта протяженности мягкой прослойкой: 5 наплавленных слоев суммарной высотой 2,8 мм и 10 наплавленных слоев суммарной высотой 5,6 мм.

## 2. Численное моделирование процесса ПЛВ

Для определения напряжений и деформаций в процессе ПЛВ использована ранее предложенная и экспериментально верифицированная расчетная модель, краткое описание основных особенностей и допущений которой представлено ниже. Последовательно связанные задачи теплопроводности в нестационарной постановке

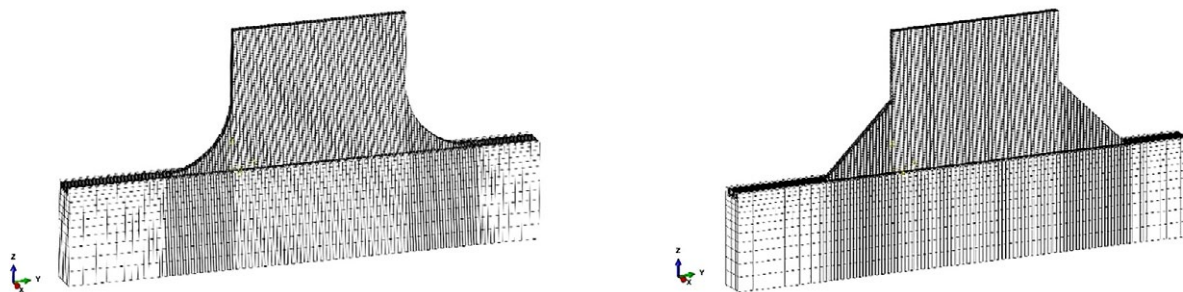
и квазистационарная задача термопластичности были решены методом конечных элементов (МКЭ). Поперечное сечение каждого из проходов представляло собой прямоугольник, размеры которого соответствовали замеренным по макрошлифу усредненной ширине и высоте проходов экспериментально полученной наплавки. Для моделирования процесса последовательной наплавки слоев была использована техника «рождения и смерти» элементов. Перед началом расчета элементы, соответствующие наплавленному металлу деактивировались. Последовательная активация элементов производилась согласно экспериментальной траектории наплавки изделия. Обработка полученных результатов и их визуализация производилась в программном обеспечении Matlab. Примеры расчетных сеток показаны на рис. 2. Как видно, расчетная сетка измельчена в области галтелей для точного учета их формы. Например, для наплавки с плоскими галтелями на торцах расчетная сетка содержала 168 680 гексаэдрных 8-узловых элементов и 181 194 узлов (см. рис. 2). Расчетное время в этом случае составило 133 часа для задачи теплопроводности и 216 часов для задачи механики деформируемого твердого тела при использовании 64 Gb RAM Windows PC с процессором AMD Ryzen Threadripper 1920X 12-core (3.50 GHz).

Модель мультилинейного изотропного упрочнения без учета ползучести была использована. Механические свойства наплавки из сплава Ti-6Al-4V были определены экспериментально [18] за исключением коэффициента Пуассона, принятого согласно [19]. Механические свойства подложки, изготовленной из деформированного сплава Ti-6Al-4V, отличались от наплавки только температурной зависимостью модуля Юнга, взятого из [19]. Температурные зависимости теплофизических свойств, таких как теплоемкость, теплопроводность, плотность, были взяты одинаковыми для всей модели согласно [20].



**Рис. 1.** Схемы вариантов анализируемых наплавок: базовый вариант (*a*); наплавка с мягкой прослойкой (*b*); наплавка с плоскими (*c*) и вогнутыми (*d*) галтелями.

**Fig. 1.** Alternative design layouts of the analyzed deposits: basic design (*a*); deposit with a soft interlayer (*b*); deposit with flat (*c*) and concave (*d*) fillets.



**Рис. 2.** Примеры конечно-элементных сеток, использованных в расчетах.  
**Fig. 2.** Examples of finite element meshes used in designs.

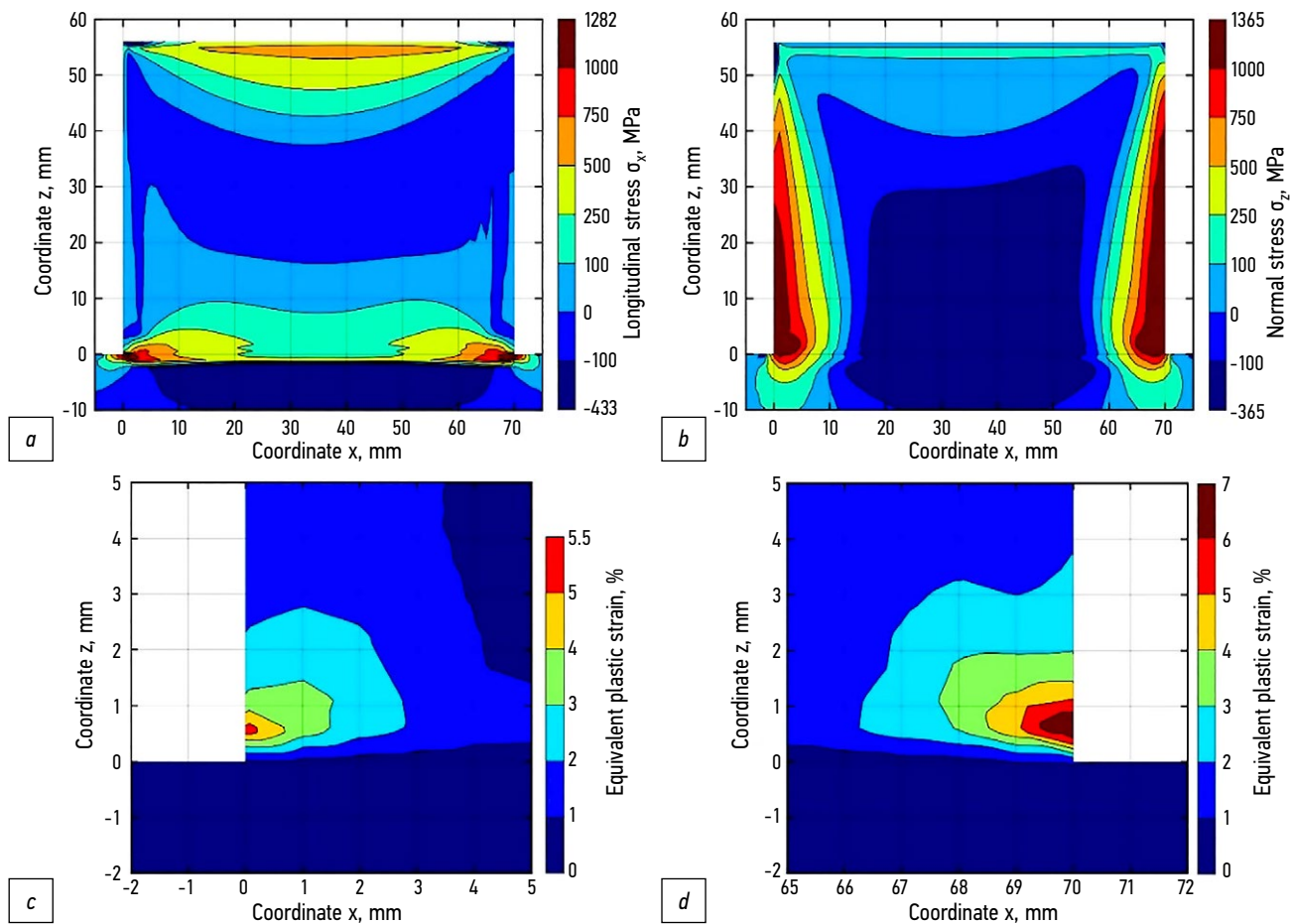
Механические и теплофизические свойства технической чистого титана (Ср-Ti Grade 2) взяты из [20–22].

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

### 1. Поле остаточных напряжений и деформаций при наплавке стенки без галтелей

Увеличение высоты наплавки в 2 раза по сравнению с ранее проанализированной в [8] не приводит

к изменению характера распределения продольных напряжений  $\sigma_x$  вблизи вершины наплавки (рис. 3, *a*). Основные изменения наблюдаются в средней части наплавки, где формируется область сжимающих напряжений  $\sigma_x$ . Практически во всем объеме наплавки продольные напряжения изменяются в пределах  $\pm 200$  МПа. Сравнение полученных полей нормальных напряжений  $\sigma_z$  (рис. 3, *b, d*) с представленными в [8] для наплавки высотой 28 мм показали, что увеличение высоты приводит к расширению области концентрации растягивающих напряжений  $\sigma_z$ ,



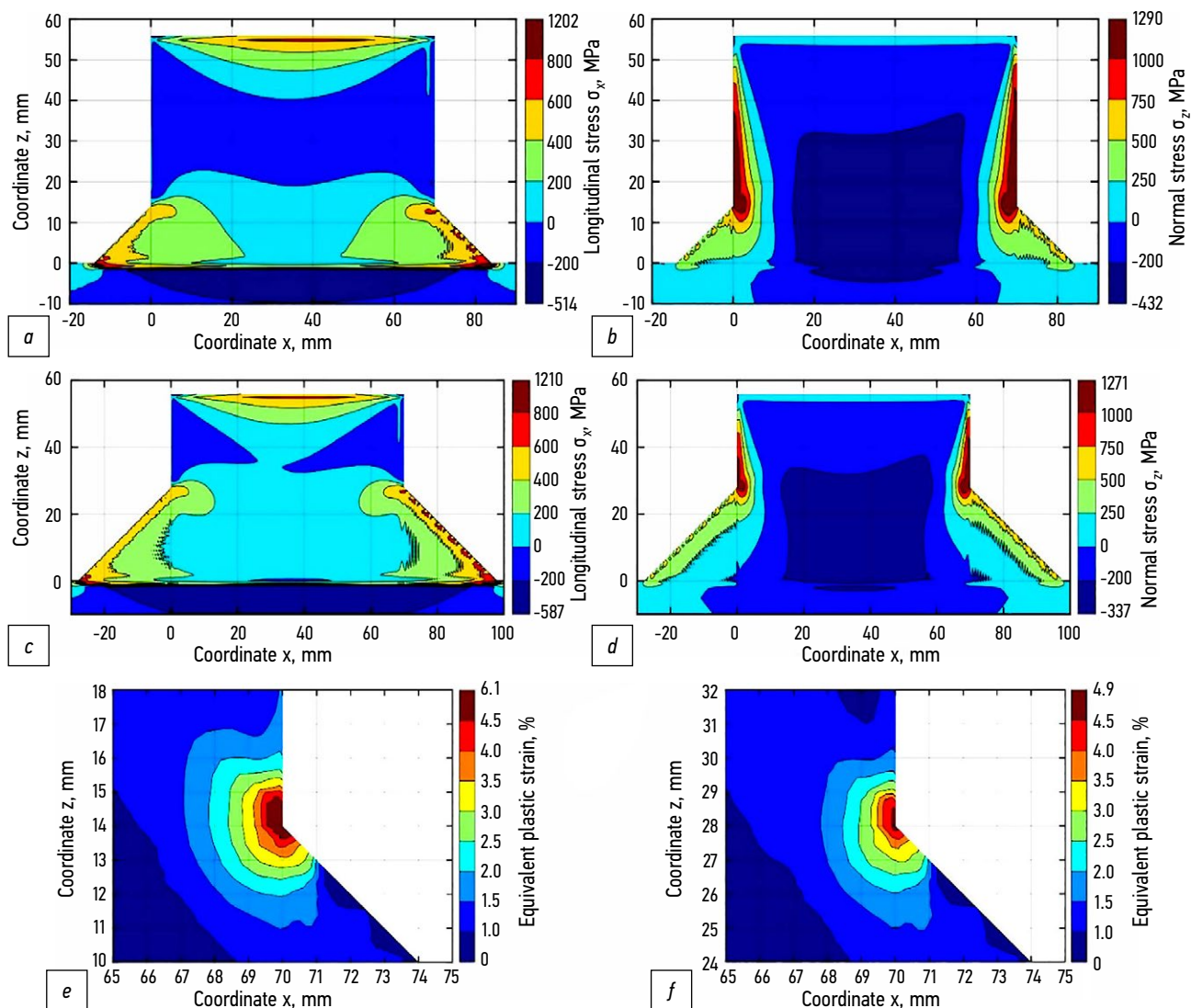
**Рис. 3.** Поля остаточных продольных (*a*) и нормальных (*b*) напряжений, накопленных пластических деформаций (*c, d*) в наплавке из сплава Ti-6Al-4V без галтелей.  
**Fig. 3.** Fields of residual longitudinal (*a*) and normal (*b*) stresses and accumulated plastic deformations (*c, d*) in a Ti-6Al-4V deposit without fillets.



превышающих предел текучести. На левом торце, где начинается наплавка слоев, эта область достигает половины высоты наплавки, а на противоположном торце уже захватывает 80% высоты. Расширение областей растягивающих напряжений у торцов наплавки может быть уравновешено только за счет увеличения уровня сжимающих напряжений в центре наплавки. Накопленные пластические деформации при увеличении высоты стенки в два раза увеличиваются лишь на 1,1% (рис. 3, с, d). Максимальная величина деформаций, составляющая 7%, превышает пластичность сплава Ti-6Al-4V, полученного методом ПЛВ [18]. На практике локальная пластичность металла вблизи массивной подложки будет ниже, чем у остальной наплавки, вследствие более высокой скорости охлаждения. Это является причиной отрыва торцов наплавки от подложки.

## 2. Напряжения и деформации в наплавке с плоских галтелями на торцах

Добавление на торцах плоских галтелей не приводит к существенному изменению характера распределения продольных напряжений, как видно на рис. 4, а, с. Можно отметить уменьшение областей, в которых растягивающие напряжения  $\sigma_x$  превышают предел текучести. Вблизи поверхности галтелей формируются области растягивающих напряжений  $\sigma_x$ , не превышающих 600 МПа. Наибольшее изменение претерпевает распределение нормальных напряжений. Как видно из рис. 4, b, d, области концентрации растягивающих напряжений  $\sigma_z$  на торцах наплавки отдаляются от подложки на величину равную катету галтели. Причем чем больше величина катета, тем меньше размеры этих областей. Наличие



**Рис. 4.** Поля остаточных продольных (а, с) и нормальных (b, d) напряжений, накопленных пластических деформаций (e, f) в наплавке из сплава Ti-6Al-4V с плоскими галтелями катетом 14 мм (а, с, e) и 28 мм (b, d, f) на торцах.

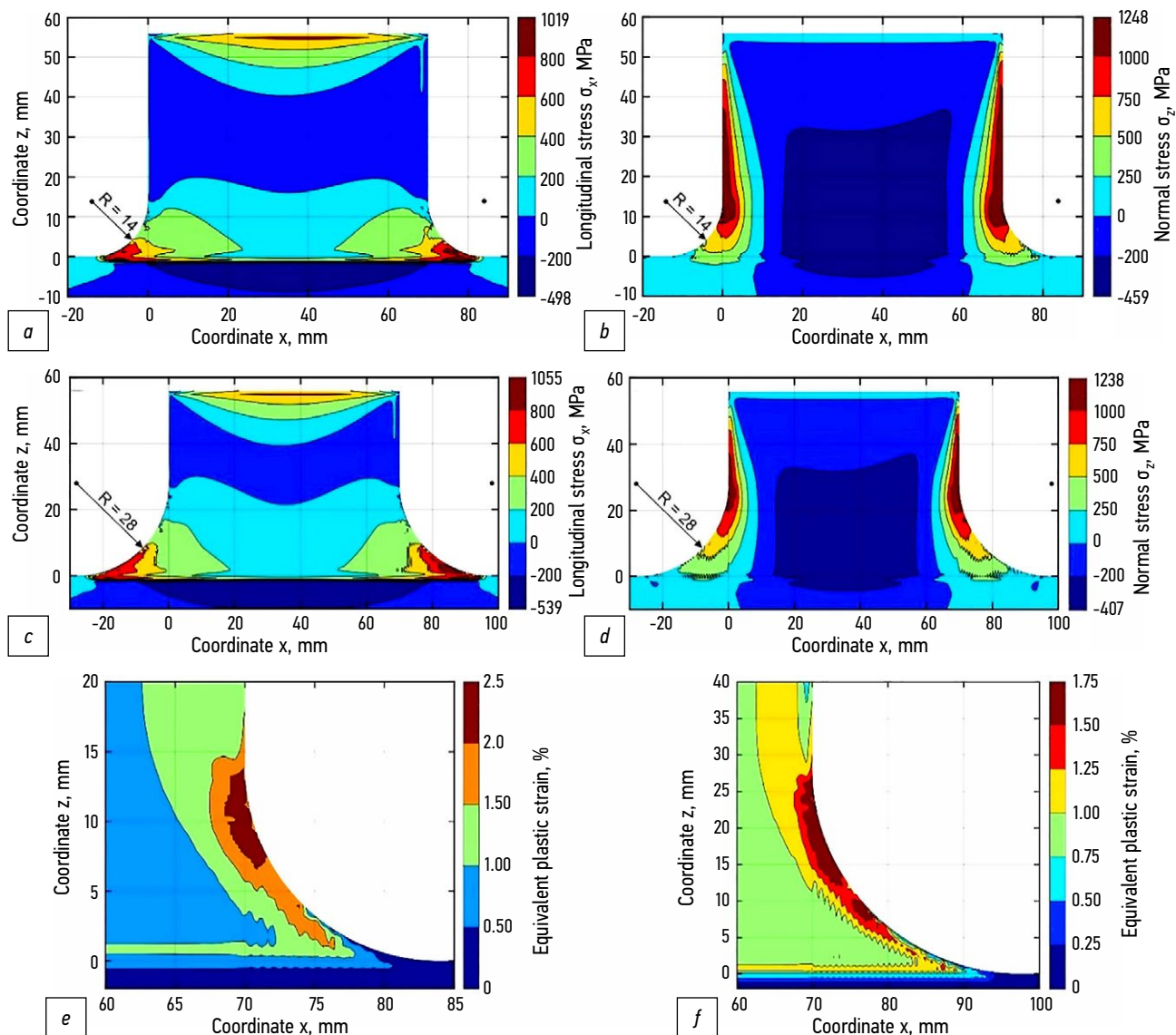
**Fig. 4.** Fields of residual longitudinal (a, c) and normal (b, d) stresses and accumulated plastic deformations (e, f) in a Ti-6Al-4V deposit with flat fillets with a leg length of 14 mm (a, c, e) and 28 mm (b, d, f) at the ends.

галтелей оказывает незначительное влияние на величину накопленных пластических деформаций (рис. 4, e, f). Увеличение катета в 2 раза приводит к снижению пластических деформаций на 20%, а по сравнению с прямой стенкой — лишь на 30%. Удаление областей концентрации напряжений и деформаций от подложки должно оказать положительный эффект на пластичность наплавляемого металла за счет более плавного охлаждения. Недостатком данного конструктивного решения является необходимость наплавки значительного объема дополнительного металла.

### 3. Напряжения и деформации в наплавке с вогнутыми галтелями на торцах

Показанные на рис. 5, a, с поля продольных напряжений не отличаются по характеру распределения

от описанных п. 1 и 2. Можно отметить увеличение областей растягивающих напряжений, формирующихся вблизи перехода от галтелей к подложке. Из рис. 5, b, d видно, что области концентрации растягивающих нормальных напряжений и накопленных пластических деформаций смещены от подложки в вертикальном направлении. При радиусе галтели 14 мм смещение составляет примерно 8 мм, а при радиусе 28 мм уже 20 мм. Уровень пластических деформаций существенно ниже, чем в случае плоских галтелей. Вогнутые галтели приводят к снижению пластических деформации по сравнению с наплавкой без галтелей в 2,8 раза при радиусе галтели 14 мм и в 5,83 раза при радиусе галтели 28 мм. Можно с уверенностью утверждать, что при наличии вогнутых галтелей разрушение наплавки не произойдет.



**Рис. 5.** Поля остаточных продольных (a, c) и нормальных (b, d) напряжений, накопленных пластических деформаций (e, f) в наплавке из сплава Ti-6Al-4V с вогнутыми галтелями радиусом 14 мм (a, c, e) и 28 мм (b, d, f) на торцах.  
**Fig. 5.** Fields of residual longitudinal (a, c) and normal (b, d) stresses and accumulated plastic deformations (e, f) in a Ti-6Al-4V deposit with concave fillets with a radius of 14 mm (a, c, e) and 28 mm (b, d, f) at the ends.

#### 4. Напряженно-деформированное состояние наплавки с градиентным переходом

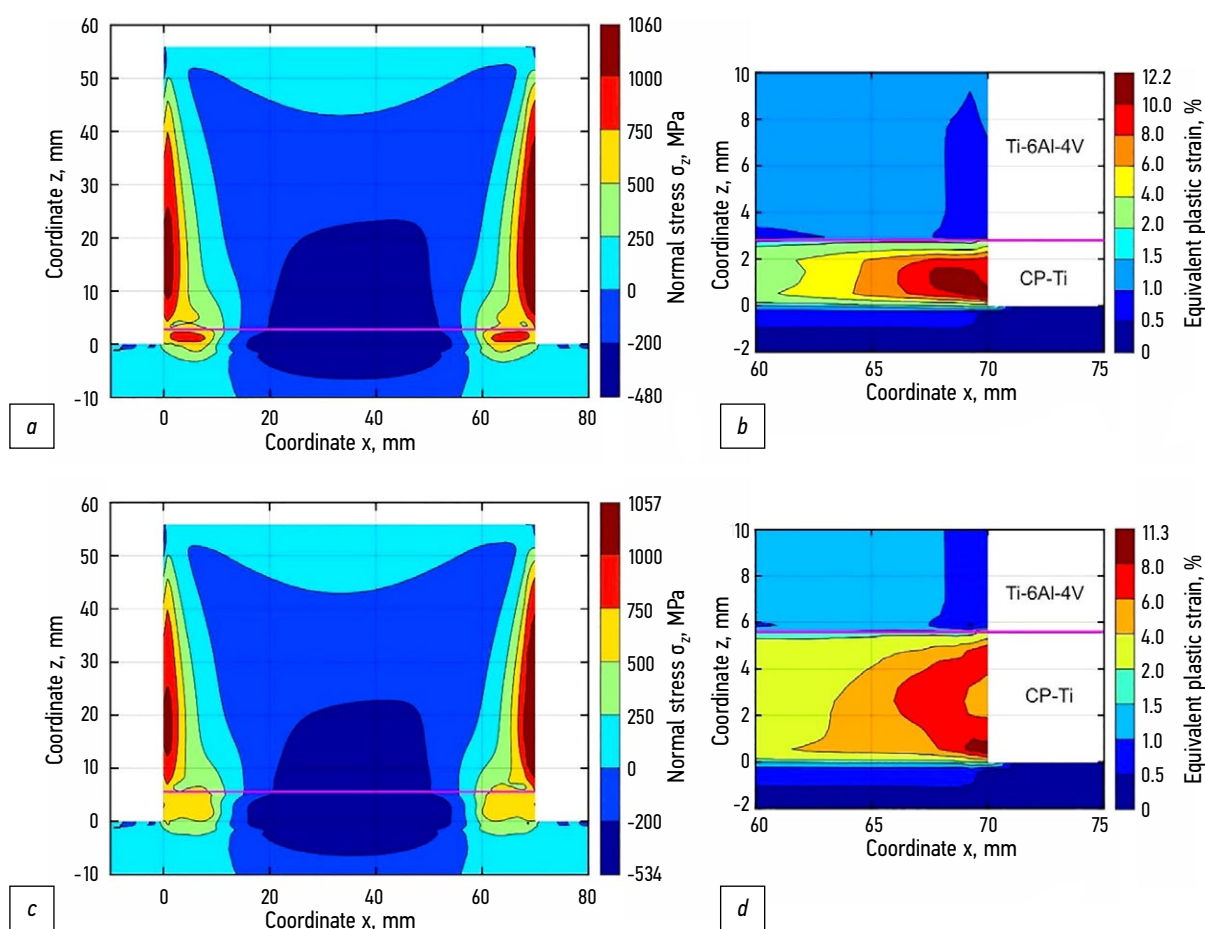
Наличие менее прочной, но более пластичной прослойки приводит к неоднородному деформированию наплавки (рис. 6). Очаги пластического деформирования находятся на торцах наплавки в области мягкой прослойки из технически чистого титана, имеющей более низкое значение предела текучести, чем сплав Ti-6Al-4V. Накопленные пластические деформации здесь достигают 12,2% и мало изменяются при увеличении вдвое ширины прослойки. Поскольку экспериментально замеренная пластичность чистого титана, полученного ПЛВ, составляет 24,5% [22] можно предположить, что в данных областях не возникнет разрушение. Чем тоньше мягкая прослойка, тем больше величина градиента пластических деформаций и тем выше степень трехосности напряженного состояния. Более прочная часть наплавки из сплава Ti-6Al-4V практически не претерпевает пластического деформирования в обоих рассмотренных случаях. Уровень нормальных напряжений и протяженность областей концентрации нормальных напряжений в этой

части наплавки существенно меньше, чем в наплавке только из сплава Ti-6Al-4V (см. п. 1).

#### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Плоские галтели оказывают незначительное влияние на величину остаточных напряжений и накопленных пластических деформаций. Увеличение катета в 2 раза с 14 мм до 28 мм приводит к снижению пластических деформаций на 20%, а по сравнению с наплавкой без галтелей — лишь на 30%. Удаление областей концентрации напряжений и деформаций от подложки на величину равную катету галтели должно оказать положительный эффект на пластичность наплавляемого в этой области металла за счет более плавного охлаждения.

Вогнутые галтели приводят к снижению пластических деформаций по сравнению с наплавкой без галтелей в 2,8 раза при радиусе галтели 14 мм и в 5,83 раз при радиусе галтели 28 мм. Можно с уверенностью утверждать, что при наличии вогнутых галтелей на торцах разрушение наплавки не произойдет.



**Рис. 6.** Поля остаточных нормальных напряжений (а, с) и накопленных пластических деформаций (b, d) в наплавке с первыми 5 (a, b) и 10 (c, d) слоями из чистого титана.

**Fig. 6.** Fields of residual normal stresses (a, c) and accumulated plastic deformations (b, d) in a deposit with the first 5 (a, b) and 10 (c, d) layers of pure titanium.

Наличие менее прочной, но более пластичной прослойки между жесткой подложкой и наплавкой из более прочного сплава приводит к неоднородному деформированию наплавки. Максимальный уровень накопленных пластических деформаций достигается на торцах наплавки в области мягкой прослойки и мало зависит от протяженности прослойки. Более прочная часть наплавки из сплава Ti-6Al-4V практически не претерпевает пластического деформирования.

## ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ИНФОРМАЦИЯ

**Вклад авторов.** С.Ю. Иванов — поиск публикаций по теме статьи, написание текста рукописи, редактирование текста рукописи, создание изображений, экспертная оценка, утверждение финальной версии. Автор несет ответственность за все аспекты работы, гарантируя надлежащее рассмотрение и решение вопросов, связанных с точностью и добросовестностью любой её части.

**Источники финансирования.** Исследование было профинансировано Министерством науки и высшего образования Российской Федерации в рамках программы исследовательского центра мирового уровня: Передовые цифровые технологии (контракт № 075-15-2022-312 от 20 апреля 2022 г.).

**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.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. DebRoy T., Wei H.L., Zuback J.S., et al. Additive manufacturing of metallic components—Process, structure and properties // *Prog Mater Sci.* 2018. Vol. 92, P. 112–224. doi: 10.1016/j.pmatsci.2017.10.001 EDN: YIDPUX
2. Sames W.J., List F.A., Pannala S., et al. The metallurgy and processing science of metal additive manufacturing // *Int. Mater. Rev.* 2016. Vol. 61, N. 5. P. 315–360.
3. Song T., Dong T., Lu S.L., et al. Simulation-informed laser metal powder deposition of Ti-6Al-4V with ultrafine lamellar structures for desired tensile properties // *Additive Manufacturing.* 2021. Vol. 46. doi: 10.1016/j.addma.2021.102139 EDN: WVVVAC
4. Chen J., Fabijanic D., Zhang T., et al. Deciphering the transformation pathway in laser powder-bed fusion additive manufacturing of Ti-6Al-4V alloy // *Additive Manufacturing.* 2022. Vol. 58. doi: 10.1016/j.addma.2022.103041 EDN: VMLDHD
5. Babkin K., Zemlyakov E., Ivanov S., et al. Distortion prediction and compensation in direct laser deposition of large axisymmetric Ti-6Al-4V part // *Procedia CIRP.* 2020. Vol. 94. P. 357–361. doi: 10.1016/j.procir.2020.09.145 EDN: MJGCHJ
6. Turichin G., Zemlyakov E., Babkin K., et al. Analysis of distortion during laser metal deposition of large parts // *Procedia CIRP.* 2018. Vol. 74. P. 154–157. doi: 10.1016/j.procir.2018.08.068 EDN: LSGWIV
7. Gouge M., Michaleris P. *Thermo-mechanical modeling of additive manufacturing.* Oxford: Butterworth-Heinemann, 2017.
8. Ivanov S., Artinov A., Zemlyakov E., et al. Spatiotemporal evolution of stress field during direct laser deposition of multilayer thin wall of Ti-6Al-4V // *Materials.* 2022. Vol. 15, N. 1. doi: 10.3390/ma15010263 EDN: YQUHPT
9. Radaj D. *Heat effects of welding.* Berlin: Springer, 1992.
10. Masubuchi K. *Analysis of welded structures: residual stresses, distortion, and their consequences.* Oxford: Pergamon, 1980.
11. Honnige J.R., Colegrove P., Williams S. Improvement of microstructure and mechanical properties in Wire + Arc Additively Manufactured Ti-6Al-4V with Machine Hammer Peening // *Procedia Engineering.* 2017. Vol. 216. P. 8–17. doi: 10.1016/j.proeng.2018.02.083
12. Colegrove P., Coules H., Fairman J., et al. Microstructure and residual stress improvement in wire and arc additively manufactured parts through high-pressure rolling // *Journal of Materials Processing Technology.* 2013. Vol. 213, N. 10. P. 1782–1791. doi: 10.1016/j.jmatprotec.2013.04.012
13. Honnige J.R., Colegrove P.A., Ganguly S., et al. Control of residual stress and distortion in aluminium wire + arc additive manufacture with rolling // *Additive Manufacturing.* 2018. Vol. 22. P. 775–783.
14. Lu X., Chiumenti M., Cervera M., et al. Mitigation of residual stresses and microstructure homogenization in directed energy deposition processes // *Engineering with Computers.* 2022. Vol. 38. P. 4771–4790. doi: 10.1007/s00366-021-01563-9 EDN: BCYCHE
15. Lu X., Chiumenti M., Cervera M., et al. Substrate design to minimize residual stresses in Directed Energy Deposition AM processes // *Materials and Design.* 2021. Vol. 202. doi: 10.1016/j.matdes.2021.109525 EDN: TZILGQ
16. Turichin G.A., Klimova-Korsmik O.G., Babkin K.D., Ivanov S.Y. Additive manufacturing of large parts. In: Pou J., Riveiro A., Paulo Davim J. (eds) *Additive Manufacturing.* Elsevier, 2021. P. 531–568.
17. Reichardt A., Shapiro A., Otis R., et al. Advances in additive manufacturing of metal-based functionally graded materials // *International Materials Reviews.* 2021. Vol. 66, N. 1. P. 1–29. doi: 10.1080/09506608.2019.1709354 EDN: YXAFMH

18. Ivanov S., Gushchina M., Artinov A., et al. Effect of elevated temperatures on the mechanical properties of a direct laser deposited ti-6al-4v // *Materials*. 2021. Vol. 14, N. 21. doi: 10.3390/ma14216432 EDN: NDMMSA
19. Mukherjee T., Zhang W., DebRoy T. An improved prediction of residual stresses and distortion in additive manufacturing // *Comput. Mater. Sci.* 2017. Vol. 126. P. 360–372. doi: 10.1016/j.commatsci.2016.10.003
20. Mills K.C. *Recommended values of thermophysical properties for selected commercial alloys*. Cambridge: Woodhead Publishing, 2002.
21. Moiseyev V.N. *Titanium alloys: russian aircraft and aerospace applications*. New York: CRC Press, 2005.
22. Gushchina M.O., Kuzminova Y.O., Dubinin O.N., et al. Multilayer composite Ti-6Al-4 V/Cp-Ti alloy produced by laser direct energy deposition // *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* 2023. Vol. 124. P. 907–918. doi: 10.1007/s00170-022-10521-8 EDN: QSNQIR

## REFERENCES

1. DebRoy T, Wei HL, Zuback JS, et al. Additive manufacturing of metallic components-Process, structure and properties. *Prog Mater Sci.* 2018;92:112–224. doi: 10.1016/j.pmatsci.2017.10.001 EDN: YIDPUX
2. Sames WJ, List FA, Pannala S, et al. The metallurgy and processing science of metal additive manufacturing. *International Materials Review.* 2016;61(5):315–360.
3. Song T, Dong T, Lu SL, et al. Simulation-informed laser metal powder deposition of Ti-6Al-4V with ultrafine lamellar structures for desired tensile properties. *Additive Manufacturing.* 2021;46. doi: 10.1016/j.addma.2021.102139 EDN: WVVVAC
4. Chen J, Fabijanic D, Zhang T, et al. Deciphering the transformation pathway in laser powder-bed fusion additive manufacturing of Ti-6Al-4V alloy. *Additive Manufacturing.* 2022;58. doi: 10.1016/j.addma.2022.103041 EDN: VMLDHD
5. Babkin K, Zemlyakov E, Ivanov S, et al. Distortion prediction and compensation in direct laser deposition of large axisymmetric Ti-6Al-4V part. *Procedia CIRP.* 2020;94:357–361. doi: 10.1016/j.procir.2020.09.145 EDN: MJGCHJ
6. Turichin G, Zemlyakov E, Babkin K, et al. Analysis of distortion during laser metal deposition of large parts. *Procedia CIRP.* 2018;74:154–157. doi: 10.1016/j.procir.2018.08.068 EDN: LSGWIV
7. Gouge M, Michaleris P. *Thermo-mechanical modeling of additive manufacturing*. Oxford: Butterworth-Heinemann; 2017.
8. Ivanov S, Artinov A, Zemlyakov E, et al. Spatiotemporal evolution of stress field during direct laser deposition of multilayer thin wall of Ti-6Al-4V. *Materials.* 2022;15(1). doi: 10.3390/ma15010263 EDN: YQUHPT
9. Radaj D. *Heat effects of welding*. Berlin: Springer; 1992.
10. Masubuchi K. *Analysis of welded structures: residual stresses, distortion, and their consequences*. Oxford: Pergamon; 1980.
11. Honnige JR, Colegrove P, Williams S. Improvement of microstructure and mechanical properties in Wire + Arc Additively Manufactured Ti-6Al-4V with Machine Hammer Peening. *Procedia Engineering.* 2017;216:8–17. doi: 10.1016/j.proeng.2018.02.083
12. Colegrove P, Coules H, Fairman J, et al. Microstructure and residual stress improvement in wire and arc additively manufactured parts through high-pressure rolling. *Journal of Materials Processing Technology.* 2013;213(10):1782–1791. doi: 10.1016/j.jmatprotec.2013.04.012
13. Honnige JR, Colegrove PA, Ganguly S, et al. Control of residual stress and distortion in aluminium wire + arc additive manufacture with rolling. *Additive Manufacturing.* 2018;22:775–783.
14. Lu X, Chiumenti M, Cervera M, et al. Mitigation of residual stresses and microstructure homogenization in directed energy deposition processes. *Engineering with Computers.* 2022;38:4771–4790. doi: 10.1007/s00366-021-01563-9 EDN: BCYCHE
15. Lu X, Chiumenti M, Cervera M, et al. Substrate design to minimize residual stresses in Directed Energy Deposition AM processes. *Materials and Design.* 2021;202. doi: 10.1016/j.matdes.2021.109525 EDN: TZILGQ
16. Turichin GA, Klimova-Korsmik OG, Babkin KD, Ivanov SY. Additive manufacturing of large parts. In: *Pou J, Riveiro A, Paulo Davim J. (eds) Additive Manufacturing*. Elsevier; 2021:531–568.
17. Reichardt A, Shapiro A, Otis R, et al. Advances in additive manufacturing of metal-based functionally graded materials. *International Materials Reviews.* 2021;66(1):1–29. doi: 10.1080/09506608.2019.1709354 EDN: YXAFMH
18. Ivanov S, Gushchina M, Artinov A, et al. Effect of elevated temperatures on the mechanical properties of a direct laser deposited ti-6al-4v. *Materials.* 2021;14(21). doi: 10.3390/ma14216432 EDN: NDMMSA
19. Mukherjee T, Zhang W, DebRoy T. An improved prediction of residual stresses and distortion in additive manufacturing. *Comput. Mater. Sci.* 2017;126:360–372. doi: 10.1016/j.commatsci.2016.10.003
20. Mills KC. *Recommended values of thermophysical properties for selected commercial alloys*. Cambridge: Woodhead Publishing; 2002.
21. Moiseyev VN. *Titanium alloys: russian aircraft and aerospace applications*. New York: CRC Press; 2005.
22. Gushchina MO, Kuzminova YO, Dubinin ON, et al. Multilayer composite Ti-6Al-4 V/Cp-Ti alloy produced by laser direct energy deposition. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* 2023;124:907–918. doi: 10.1007/s00170-022-10521-8 EDN: QSNQIR

## ОБ АВТОРЕ

### Иванов Сергей Юрьевич,

научный сотрудник, Институт лазерных и сварочных технологий, соискатель, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет; адрес: Россия, 190121, Санкт-Петербург, Лоцманская ул., д. 3; eLibrary SPIN: 1072-8503; e-mail: sergei.yu.ivanov@gmail.com

## AUTHOR INFO

### Sergei Yu. Ivanov,

Leading Research Associate, Institute of laser and welding technologies, Applicant, Saint Petersburg State Marine Technical University; address: 3, Lotsmanskaya st, Saint Petersburg, 190121, Russia; eLibrary SPIN: 1072-8503; e-mail: sergei.yu.ivanov@gmail.com

Оригинальное исследование

УДК 621.77.02

DOI: [https://doi.org/10.52899/24141437\\_2025\\_03\\_385](https://doi.org/10.52899/24141437_2025_03_385)

EDN: ZDAYRH

# Снятие термобарьерного покрытия посредством лазерной очистки

В.С. Жданов, Г.А. Аккузин, Г.Г. Задыкян, Р.С. Корсмик

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

## АННОТАЦИЯ

**Актуальность.** Различные типы покрытий используются для защиты конструкционных материалов от коррозии и износа, а также для обеспечения теплоизоляции. Среди них наиболее сложную структуру имеют те покрытия, которые эксплуатируются в условиях высоких температур, например, в авиационных и промышленных газотурбинных двигателях, изолируя компоненты турбины от потока горячего газа, повышая этим долговечность и энергоэффективность двигателей [1]. К термобарьерным покрытиям предъявляются три основных требования: низкая температуропроводность, стабильность при высоких температурах, высокая долговечность, поэтому удалить их довольно трудно.

**Цель** — решение проблемы снятия термобарьерного покрытия с рабочих лопаток газотурбинных двигателей, которые подвергаются интенсивному износу из-за сложных условий эксплуатации. В качестве наиболее эффективного метода очистки предлагается технология лазерной очистки — передовая технология, позволяющая найти решения для снижения производственных затрат и повышения производительности и качества производственного процесса [2]. Обсуждается важность сохранения основного материала лопатки при снятии термобарьерного покрытия для его последующей эксплуатации (нанесения нового покрытия). Ставится цель удалить термобарьерного покрытия без повреждения основного металла и определить оптимальный режим для данного рода задач.

**Методы.** Для достижения цели лопатка из сплава ЧС-70ВИ подверглась резке по длине пера на несколько частей, одна из которых стала образцом-свидетелем. Эта часть не подвергалась очистке. С остальными образцами были проведены лабораторные экспериментальные исследования, направленные на изучение влияния входных параметров процесса лазерной очистки на полноту удаления термобарьерного покрытия. Далее все образцы подвергались металлографическим исследованиям для определения структуры материала, микротвердости и толщины термобарьерного покрытия.

**Результаты.** В статье представлен металлографический анализ микротвердости и толщины термобарьерного покрытия после проведения испытаний, подтверждающий эффективность лазерной очистки для обеспечения долговечности и надежности рабочих лопаток газотурбинного двигателя.

**Выводы.** В соответствии с задачами был проведен литературный обзор статей по теме лазерной очистки. Далее были выбраны диапазоны варьирования основных параметров обработки. Произведена серия экспериментов, после которой образцы были отправлены на металлографический анализ. На основе полученных в результате металлографического анализа данных определен режим, обеспечивающий полное снятие термобарьерного покрытия, и установлена зависимость толщины термобарьерного покрытия от мощности излучения.

**Ключевые слова:** лазерная очистка; термобарьерное покрытие; рабочие лопатки газотурбинных двигателей; никелированный сплав; металлографический анализ; ЧС70-ВИ; СДП-3А.

## Как цитировать

Жданов В.С., Аккузин Г.А., Задыкян Г.Г., Корсмик Р.С. Снятие термобарьерного покрытия посредством лазерной очистки // Труды Санкт-Петербургского государственного морского технического университета. 2025. Т. 4, № 3. С. 385–392. DOI: 10.52899/24141437\_2025\_03\_385 EDN: ZDAYRH

Original Study Article

DOI: [https://doi.org/10.52899/24141437\\_2025\\_03\\_385](https://doi.org/10.52899/24141437_2025_03_385)

EDN: ZDAYRH

# Removal of Thermal Barrier Coating by Laser Cleaning

Vladislav S. Zhdanov, Grigoriy A. Akkuzin, Grigoriy G. Zadykyan, Rudolf S. Korsmik

Saint Petersburg State Marine Technical University, Saint Petersburg, Russia

## ABSTRACT

**BACKGROUND:** Various types of coatings are used for corrosion and wear protection of structural materials and thermal insulation. Coatings that are used in high-temperature conditions, e.g. aircraft and industrial gas turbine engines, have the most complex structure. They are used to isolate the turbine components from the hot gas flow, increasing the durability and energy efficiency of engines [1]. Thermal barrier coatings have three main requirements, including low thermal conductivity, stability at high temperatures, and high durability, and they are fairly difficult to remove.

**AIM:** To solve the problem of removing thermal barrier coating from moving blades of gas turbine engines subjected to intensive wear in tough operating conditions. Laser cleaning technology is proposed as the most effective cleaning method. It is an advanced technology that allows finding solutions to reduce production costs and increase the performance and quality of processes [2]. The paper discusses the importance of preserving the basic blade material during thermal barrier coating removal for its subsequent use (new coating). The aim is to remove the thermal barrier coating without damaging the basic metal and to determine the optimal conditions for such works.

**METHODS:** To achieve the aim, the blade made of CS70-VI alloy was cut into several parts along the length of the airfoil; one part was selected as a check test piece that was not cleaned. The remaining test pieces were tested during laboratory experiments aimed at studying the influence of input laser cleaning parameters on the removal of the thermal barrier coating. All samples were then subjected to metallographic tests to determine the material structure, microhardness, and thickness of the thermal barrier coating.

**RESULTS:** The paper presents metallographic analysis of microhardness and thickness of thermal barrier coating after testing confirming the effectiveness of laser cleaning to ensure the durability and reliability of moving blades for gas turbine engines.

**CONCLUSION:** The study involved a literature review of papers related to laser cleaning. Next, we selected the variation ranges of the main processing parameters and conducted a series of experiments followed by the metallographic analysis of test pieces. Metallographic analysis allowed to determine the conditions ensuring complete removal of the thermal barrier coating and the relationship between the thickness of the thermal barrier coating and the radiation power.

**Keywords:** laser cleaning; thermal barrier coating; moving blades of gas turbine engines; nickel-plated alloy; metallographic analysis; CS70-VI; SDP-3A.

## To cite this article

Zhdanov VS, Akkuzin GA, Zadykyan GG, Korsmik RS. Removal of Thermal Barrier Coating by Laser Cleaning. *Transactions of the Saint Petersburg State Marine Technical University*. 2025;4(3):385–392. DOI: 10.52899/24141437\_2025\_03\_385 EDN: ZDAYRH

Submitted: 25.03.2025

Accepted: 24.06.2025

Published online: 22.09.2025

## ВВЕДЕНИЕ

Лопатки имеют высокую себестоимость изготовления ввиду сложной геометрии и дорогостоящих материалов, из которых они производятся, но быстро изнашиваются из-за условий, в которых работают [3].

Рабочих лопаток (РЛ) турбин в процессе эксплуатации подвергаются действию статических, динамических и циклических нагрузок, работают в условиях агрессивной газовой среды при высокой температуре, подвергаются механическому износу. Под воздействием перечисленных факторов происходит разрушение тела лопаток [2].

Важным пунктом является подготовка поверхности, то есть очищение слоя загрязнений, т.к. поверхности РЛ газотурбинных двигателей (ГТД) во время работы подвергаются воздействию различных загрязняющих веществ, таких как летучая зола, мелкий песок, горячее масло [3]. Кроме того, на лопатку наносится термобарьерное покрытие (ТБП) для продления времени работы, и для сохранения эффективности в термически активной среде. Примеры химического состава покрытий:  $Me-Cr-Al-Y$ ;  $Ni-Co-Cr-Al-Y$ ;  $Ni-Co-Cr-Al-Y+ZrO_2$  [4].

Основной задачей является снятие ТБП (для нанесения нового) без повреждения основного материала лопатки. Следовательно, необходима технология, с помощью которой можно выполнить эту операцию.

В данной работе рассматривается технология лазерной очистки как более точная и качественная в сравнении с альтернативными вариантами, такими как: химическая очистка при помощи различных веществ, например, фтористого водорода (HF); механическая очистка с использованием абразивных составов; пескоструйная; дробеструйная; ультразвуковая. Лазерная очистка — это передовая технология очистки поверхности, которая позволяет мгновенно удалять загрязнения, ржавчину и покрытия посредством высокоэнергетического лазерного луча для облучения поверхности компонентов [5].

Цель работы: определение оптимального режима лазерной очистки для снятия термобарьерного покрытия (ТБП) с РЛ ГТД.

В соответствии с целью работы поставлены следующие задачи:

- провести литературный обзор по теме исследования;
- провести серию экспериментов по очистке РЛ на разных режимах;
- исследовать структуру обработанных лопаток и выбрать лучший режим.

## МАТЕРИАЛЫ, ОБОРУДОВАНИЕ И МЕТОДИКА

### Материалы

В данной работе использовалась РЛ из жаропрочного сплава ЧС-70ВИ на основе никеля (Ni). В табл. 1

представлен химический состав этого сплава (содержание некоторых элементов, % по массе).



Рис. 1. Образец до очистки.

Fig. 1. Test piece before cleaning.

Таблица 1. Химический состав некоторых элементов сплава ЧС-70ВИ [8]

Table 1. Chemical composition of some CS-70VI alloying elements [8]

Элемент	Cr	Mo	Ti	Al	W	Co
Содержание, %	15–16,7	1,5–2,5	4,2–5,0	2,4–3,2	4,5–5,9	10–11,5

Таблица 2. Химический состав защитного покрытия СДП-3А [9]

Table 2. Chemical composition of SDP-3A protective coating [9]

Элемент	Co	Cr	Al	Y
Содержание, %	62,5–66,8	22–24	11–13	0,2–0,5

Жаростойкость сплава ЧС-70ВИ обусловлена включением в его состав большего количества хрома (до 16 %). Следует отметить, что в данном случае концентрация вольфрама (W) находится на нижней границе легирования, поскольку технические условия допускают его содержание от 3,5 до 5%. Именно этот элемент ответствен за уменьшение диффузии в сплаве и в значительной степени обеспечивает его жаропрочность. Сплав ЧС-70 обладает высокой длительной прочностью и жаростойкостью в интервале температур до 900 °С, в частности высокой стойкостью к сульфидной коррозии и термической стойкостью к окислению [6].

На наружную поверхность пера и верхнюю часть полки лопаток нанесено двухслойное жаростойкое покрытие системы  $Co-Cr-Al-Y$  (СДП-3А) толщиной ~120 мкм +  $ZrO_2$  (КДП-1) – ~50 мкм [9].

Процентное содержание химических элементов (по массе) защитного покрытия приведено в табл. 2.

На рис. 1 приведена фотография образца до очистки.

### Оборудование

Для лазерной очистки экспериментальных образцов применялся аппарат Raptor SFW-3000 (рис. 2, а) —



комплекс для лазерной чистки, резки и сварки с лазерной головкой RELFAR FWH20-S10A (рис. 2, *b*).

Технические характеристики аппарата Raptor SFW-3000R представлены в табл. 3.

Для проведения металлографических исследований микро- и макрошлифов образцы были подготовлены с использованием шлифовально-полировальной машины SAPHIR 250 A1-ECO, представленной на рис. 3.

Для измерения микротвердости образца по шкалам Виккерса был использован микротвердомер Future Tech FM-31, представленный на рис. 4. Расстояние между отпечатками измерений составляло 150 мкм, измерения проводились по методу Виккерса с нагрузкой в 300 г.

### Методика

Для достижения цели лопатка из сплава ЧС-70ВИ подверглась резке по длине пера на несколько частей, одна из которых стала образцом-свидетелем. Эта часть не подвергалась очистке. С остальными образцами были

**Таблица 3.** Технические характеристики Raptor SFW-3000R

**Table 3.** Raptor SFW-3000R specifications

Характеристика	Значение
Диапазон длин волн, нм	1080
Номинальная мощность, Вт	≤3000
Коллиматорное фокусное расстояние, мм	50
Фокусное расстояние, мм	150
Диапазон регулировки фокуса, мм	±10
Максимальное давление газа, МПа	≤1
Максимальная ширина чистки, мм	80
Частота, Гц	50–5000
Скорость сканирования, мм/с	1000–10 000

проведены лабораторные экспериментальные исследования, направленные на изучение влияния входных параметров процесса лазерной очистки на полноту удаления ТБП. Далее все образцы подвергались металлографическим



**Рис. 2.** Оборудование для чистки: *a* — аппарат Raptor SFW-3000R; *b* — лазерная головка RELFAR FWH20-S10A.  
**Fig. 2.** Cleaning equipment: *a*, Raptor SFW-3000R device; *b*, RELFAR FWH20-S10A laser head.



**Рис. 3.** Шлифовально-полировальная машина SAPHIR 250 A1-ECO.  
**Fig. 3.** Grinding and polishing system (SAPHIR 250 A1-ECO).



**Рис. 4.** Микротвердомер Future Tech FM-31.  
**Fig. 4.** Microhardness tester (Future Tech FM-31).

исследованиям для определения структуры материала, микротвердости и толщины ТБП.

В качестве основных технологических параметров служили: мощность лазерного излучения (Вт), частота (кГц), скорость сканирования (мм/с), ширина луча (мм).

В процессе анализа литературных источников по данной теме были выбраны варьируемые диапазоны параметров режимов очистки, приведенные в табл. 4.

Лазерная обработка экспериментальных образцов проводилась по нормали к обрабатываемой поверхности на расстоянии 300 мм от источника излучения посредством двух проходов с реверсивным движением [5].

## РЕЗУЛЬТАТЫ

### Визуальный контроль (ВК)

После проведения лазерной чистки был произведен ВК обработанных поверхностей. Контролировались дефекты поверхности типа трещин, перегрева (цвета побежалости), неравномерности удаления слоя. Внешний вид некоторых образцов представлен на рис. 5.

В результате ВК наблюдались образцы с неравномерностью очищения, проплавлениями и трещинами.

На рис. 6 представлен образец, на котором видна неравномерность очищения, вызванная малой скоростью сканирования.

**Таблица 4.** Варьируемые диапазоны параметров очистки образцов

**Table 4.** Variable ranges of test piece cleaning parameters

Мощность излучения, Вт	Частота, кГц	Скорость сканирования, мм/с	Ширина луча, мм
500–2000	3–5	5000–7000	40–60

На рис. 7 представлена фотография образца, на котором заметны повреждения от обработки: трещины и проплавления. У данного образца множество трещин и проплавлений, что обусловлено мощностью, на которой проводилась чистка, а именно 2000 Вт. Повреждения по краям, в отличие от середины, объясняются более тонким слоем материала.

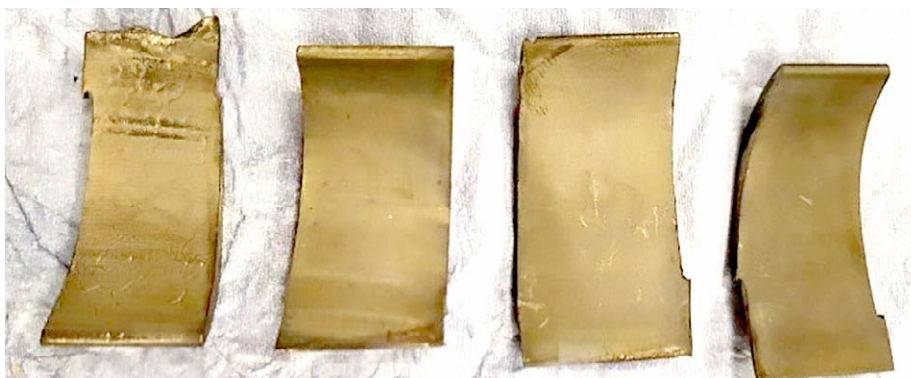
На рис. 8 приведена фотография образца, обработанного на мощности 1500 Вт. На левом краю этого образца видно потемнение, вызванное чрезмерным нагревом поверхности.

На рис. 9 приведенные образцы более светлые, чем предыдущие, следовательно, ТБП не снято.

Далее все образцы, вне зависимости от дефектов, были отправлены на металлографический анализ.

### Металлографический анализ

С образцов, отправленных на металлографический анализ, снимались характеристики: толщина ТБП,



**Рис. 5.** Образцы после чистки.

**Fig. 5.** Test pieces after cleaning.



**Рис. 6.** Образец с неравномерностью очищения.

**Fig. 6.** Unevenly cleaned test piece.



**Рис. 7.** Образец с трещинами и проплавлениями.

**Fig. 7.** Test piece with cracks and penetrations.



**Рис. 8.** Образец, обработанный на мощности 1500 Вт.  
**Fig. 8.** Test piece processed at 1500 W.



**Рис. 9.** Образцы с неснятым термобарьерным покрытием.  
**Fig. 9.** Test pieces with the thermal barrier coating not removed.

микротвердость, химический состав. После получения результатов были составлены графики и диаграммы, отображающие зависимости измеряемых характеристик от мощности излучения лазера.

На рис. 10 приведена зависимость толщины ТБП от мощности. Исходное значение толщины ТБП — 150 мкм.

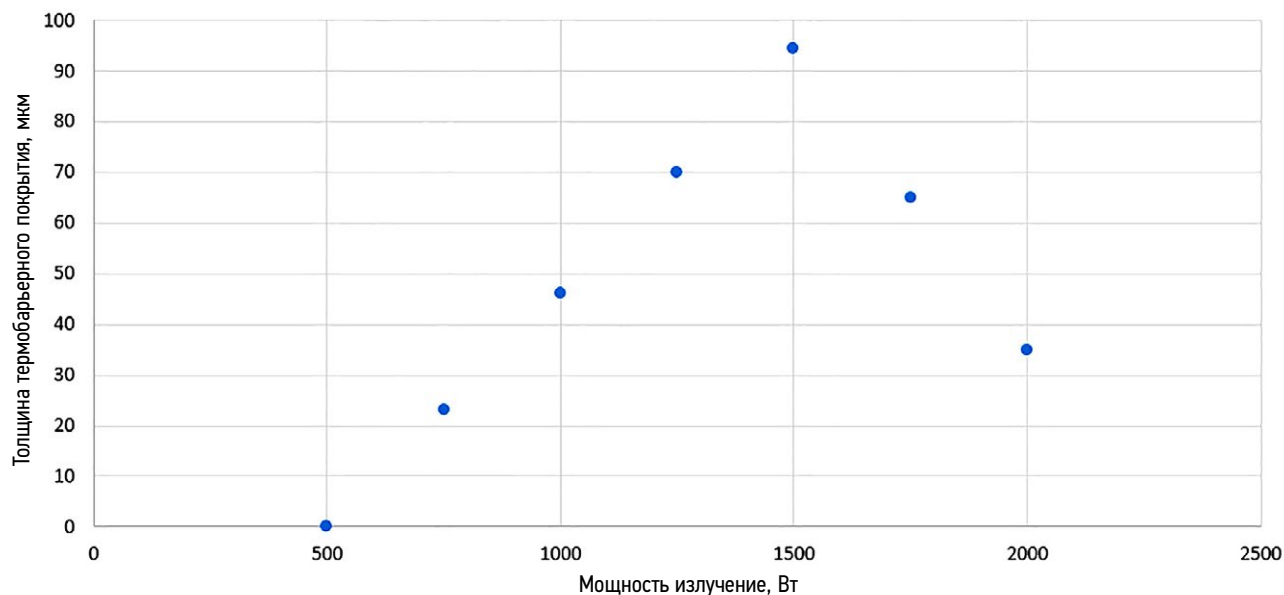
Из этого графика следует, что наиболее эффективной мощностью является 500 Вт, т.к. при этом значении достигается минимальная толщина ТБП.

На рис. 11 показан график зависимости микротвердости от мощности. Начальное значение микротвердости поверхности — 402 HV.

По графику видно, что значение микротвердости в зависимости от мощности резко не изменяется и находится в установленном техническими условиями диапазоне, следовательно, основной металл не поврежден, что означает правильно выбранные характеристики обработки.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В соответствии с задачами был проведен литературный обзор статей по теме лазерной очистки. Далее были выбраны диапазоны варьирования основных параметров обработки. Произведена серия экспериментов, после которой образцы были отправлены на металлографический анализ. На основе полученных в результате металлографического анализа данных определен режим, обеспечивающий полное снятие ТБП, и установлена зависимость толщины ТБП от мощности излучения.



**Рис. 10.** Зависимость толщины термобарьерного покрытия от мощности.  
**Fig. 10.** Relationship between the thermal barrier coating thickness and the power.

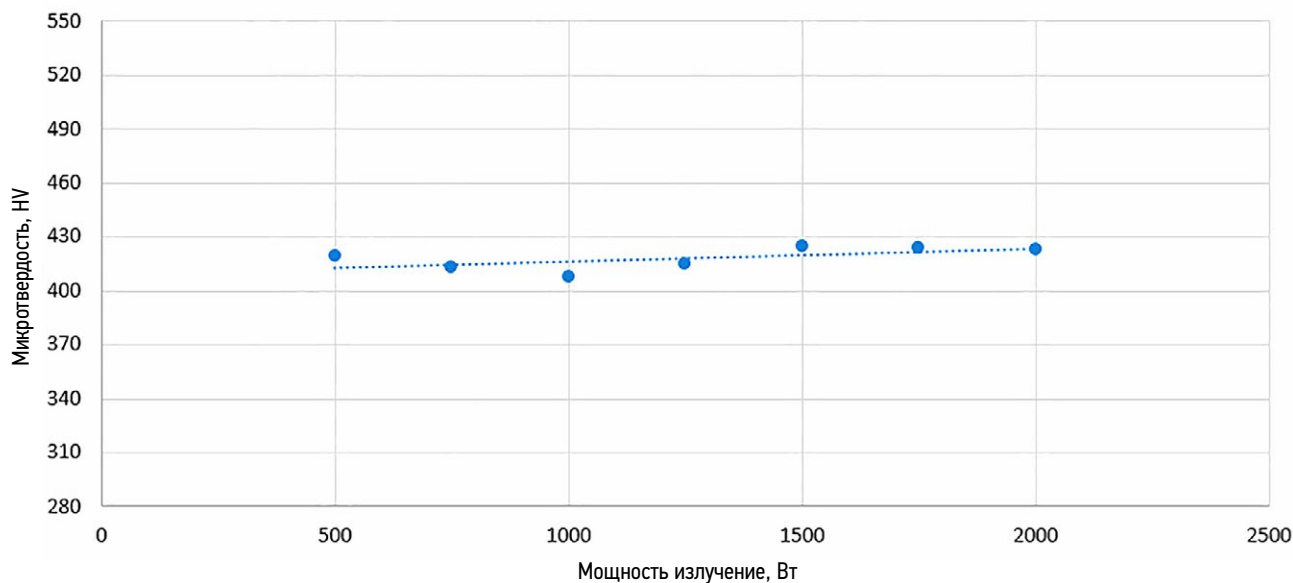


Рис. 11. Зависимость микротвердости от мощности.

Fig. 11. Relationship between the microhardness and the power.

## ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ИНФОРМАЦИЯ

**Вклад авторов.** В. Жданов и Г. Аккузин — поиск публикаций по теме статьи, написание текста рукописи, редактирование текста рукописи, редактирование текста рукописи, создание изображений; Г. Задыкян и Р. Корсмик — 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.

**Рассмотрение и рецензирование.** Настоящая работа подана в журнал в инициативном порядке и рассмотрена по обычной процедуре.

В рецензировании участвовали один рецензент, член редакционной коллегии и научный редактор издания.

## ADDITIONAL INFORMATION

**Author contributions:** V.S. Zhdanov, G.A. Akkuzin: investigation, writing—original draft, writing—review & editing, visualization; G.G. Zadykyan, R.S. Korsmik: expert review, validation. All the authors approved the version of the manuscript to be published and agree to be accountable for all aspects of the work, ensuring that issues related to the accuracy or integrity of any part of the work are appropriately investigated and resolved.

**Funding sources:** No funding.

**Disclosure of interests:** The authors have no relationships, activities, or interests for the last three years related to for-profit or not-for-profit third parties whose interests may be affected by the content of the article.

**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 reviewer, a member of the editorial board and the scientific editor of the publication participated in the review.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Padture N.P., Gell M., Jordan E.H. Thermal Barrier Coatings for Gas-Turbine Engine Applications. In: Science: Reflections on Self: Immunity and Beyond. Washington: Science, 2002. P. 280–284.
2. Burdel T., Weiler S., Faißt B., et al. Lasers and applications in parts cleaning and surface pre-treatment // Proceedings of SPIE — The International Society for Optical Engineering. 2013. doi: 10.1117/12.2004124
3. Кротинов Н.Б. Продление ресурса лопаток газотурбинных двигателей упрочняющей обработкой // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2016. № 5. С. 221. EDN: WLNAXX
4. Корсмик Р.С. Порошковая наплавка жаропрочного никелевого сплава ЖС32 на рабочие лопатки газотурбинных двигателей. дисс. канд. техн. наук. Санкт-Петербург, 2022. EDN: XYDWWH

5. Jafari Eskandari M., Karimi M., Araghchi M., Hadipour A. Laser cleaning process of high-pressure turbine blade: Characterization and removal of surface contaminants // *Surface and Coatings Technology*. 2023. № 470. С. 401. DOI: 10.1016/j.surfcoat.2023.129885 EDN: FIWWPK

6. Каблов Е.Н., Мубояджян С.А. Жаростойкие и теплозащитные покрытия для лопаток турбины высокого давления перспективных ГТД // *Авиационные материалы и технологии*. 2012. № 5. С. 60–70. EDN PFTMXZ

7. Zhu G., Xu Z., Jin Y., et al. Mechanism and application of laser cleaning: A review // *Optics and Lasers in Engineering*. 2022. № 157. P. 180–194. DOI: 10.1016/j.optlaseng.2022.107130 EDN: KQKYW

8. Давыдов Д.И. Структура турбинной лопатки из сплава ЧС-70 после аварийного воздействия. В кн.: *X Международная научно-техническая Уральская школа-семинар металлургов — молодых ученых* (Екатеринбург, 7–11 декабря 2009 г.). Екатеринбург, 2009. С. 224–226.

9. Тарасенко Ю.П., Сорокин В.А., Бердник О.Б., Кривина Л.А. Аналитическая оценка постэксплуатационного состояния лопаток турбин высокого давления двигателей ДЦ 59Л и ДЖ 59 и технологические особенности их ремонтно-восстановительной обработки // *Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета им. академика С.П. Королёва (национального исследовательского университета)*. 2006. № 2-1.

## REFERENCES

1. Padture NP, Gell M, Jordan EH. Thermal Barrier Coatings for Gas-Turbine Engine Applications. In: *Science: Reflections on Self: Immunity and Beyond*. Washington: Science. 2002. P. 280–284.

2. Burdel T, Weiler S, Faißt B, et al. Lasers and applications in parts cleaning and surface pre-treatment. *Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering*. 2013. doi: 10.1117/12.2004124

3. Krotinov NB. Extension of the service life of gas turbine engine blades by hardening treatment. *Izvestiya Tuls'kogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskie nauki*. 2016;5:221. (In Russ.) EDN: WLNAXX

4. Korsmik R.S. *Powder surfacing of heat-resistant nickel alloy ZhS32 on working blades of gas turbine engines*. [dissertation] St. Petersburg; 2022. (In Russ.) EDN: XYDWWH

5. Jafari Eskandari M, Karimi M, Araghchi M, Hadipour A. Laser cleaning process of high-pressure turbine blade: Characterization and removal of surface contaminants. *Surface and Coatings Technology*. 2023;470:401. doi: 10.1016/j.surfcoat.2023.129885 EDN: FIWWPK

6. Kablov EN, Muboyadzhyan SA. Heat-resistant and heat-protective coatings for high-pressure turbine blades of advanced gas turbine engines. *Aviatsionnye materialy i tekhnologii*. 2012;5:60–70. (In Russ.) EDN PFTMXZ

7. Zhu G, Xu Z, Jin Y, et al. Mechanism and application of laser cleaning: A review. *Optics and Lasers in Engineering*. 2022;157:180–194. doi: 10.1016/j.optlaseng.2022.107130 EDN: KQKYW

8. Davydov DI. Structure of a turbine blade made of ChS-70 alloy after an accidental impact. In: *X International scientific and technical Ural school-seminar of metallurgists – young scientists (Ekaterinburg, December 7–11, 2009)*. Ekaterinburg; 2009:224–226. (In Russ.)

9. Tarasenko YuP, Sorokin VA, Berdnik OB, Krivina LA. Analytical assessment of the post-operational condition of high-pressure turbine blades of the DC 59L and DJ 59 engines and technological features of their repair and restoration processing. *Vestnik Samarskogo gosudarstvennogo aerokosmicheskogo universiteta im. akademika S.P. Koroleva (natsionalnogo issledovatel'skogo universiteta)*. 2006;2-1. (In Russ.)

## ОБ АВТОРАХ

### \* Задьян Григорий Григорович,

инженер технологического отдела, институт лазерных и сварочных технологий, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет; адрес: Россия, 198262, Санкт-Петербург, пр. Маршала Жукова, 38-а; eLibrary SPIN: 5240-2062; e-mail: gzadykyan@mail.ru

### Корсмик Рудольф Сергеевич,

канд. техн. наук, доцент кафедры цифровых лазерных технологий, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет; eLibrary SPIN: 6726-2629; e-mail: r.korsmik@lrc.ru

### Жданов Владислав Сергеевич,

магистрант кафедры цифровых лазерных технологий, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет; e-mail: fylhtq1995ujlf@gmail.com

### Аккузин Григорий Андреевич,

магистрант кафедры цифровых лазерных технологий, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет; e-mail: Akkuzyn@yandex.ru

## AUTHORS' INFO

### \* Grigoriy G. Zadykyan,

engineer of the technology department, Institute of Laser and Welding Technologies, Saint Petersburg State Marine Technical University; address: 38-a Marshala Zhukova Ave, Saint Petersburg, Russia, 198262; eLibrary SPIN: 5240-2062; e-mail: gzadykyan@mail.ru

### Rudolf S. Korsmik,

Cand. Sci. (Engineering), Associate Professor of the Department of Digital Laser Technologies, Saint Petersburg State Marine Technical University; eLibrary SPIN: 6726-2629; e-mail: r.korsmik@lrc.ru

### Vladislav S. Zhdanov,

Master's student of the Department of Digital Laser Technologies, Saint Petersburg State Marine Technical University; e-mail: fylhtq1995ujlf@gmail.com

### Grigoriy A. Akkuzin,

Master's student of the Department of Digital Laser Technologies, Saint Petersburg State Marine Technical University; e-mail: Akkuzyn@yandex.ru

\* Автор, ответственный за переписку / Corresponding author

Оригинальное исследование

УДК 621.373.1

DOI: [https://doi.org/10.52899/24141437\\_2025\\_03\\_393](https://doi.org/10.52899/24141437_2025_03_393)

EDN: UJTAQB

# Математические и схемные модели испытательных генераторов импульсных помех для расчетов в области электромагнитной совместимости

А.А. Воршевский, П.А. Воршевский, М.Т. Киав, Х.А. Хейн

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

## АННОТАЦИЯ

**Актуальность.** Судовое электронное и электротехническое оборудование не может быть поставлено на суда, если оно не соответствует требованиям по устойчивости, предъявляемым к импульсным помехам. При испытаниях оборудования, спроектированного без учета этих требований, фиксируются сбои в его работе. Важно уметь прогнозировать эффекты воздействия помех на стадии проектирования оборудования.

**Цель работы** — дать математические и схемные модели испытательных генераторов импульсных помех для оценки устойчивости схем оборудования к импульсным помехам при их разработке.

**Методы.** Результаты работы базируются на требованиях Российского морского регистра судоходства по электромагнитной совместимости, документах международной электротехнической комиссии серии IEC 61000-4. Используются математические описания сигналов импульсной формы, программы моделирования схем в области электротехники.

**Результаты.** Даны формулы, описывающие импульсные помехи со стандартными параметрами. Приведены детальные схемы испытательных генераторов для использования в моделирующих программах, даны примеры результатов моделирования и погрешности имитируемых параметров помех.

**Выводы.** Применение предложенных моделей позволяет прогнозировать результат воздействия помех на стадии проектирования оборудования до проведения испытаний на помехоустойчивость, что сокращает время и затраты на доработку оборудования.

**Ключевые слова:** генератор импульсных помех; математическая модель; схема для моделирования; испытания; электромагнитная совместимость.

## Как цитировать

Воршевский А.А., Воршевский П.А., Киав М.Т., Хейн Х.А. Математические и схемные модели испытательных генераторов импульсных помех для расчетов в области электромагнитной совместимости // Труды Санкт-Петербургского государственного морского технического университета. 2025. Т. 4, № 3. С. 393–400. DOI: 10.52899/24141437\_2025\_03\_393 EDN: UJTAQB

Original Study Article

DOI: [https://doi.org/10.52899/24141437\\_2025\\_03\\_393](https://doi.org/10.52899/24141437_2025_03_393)

EDN: UJTAQB

# Mathematical Models and Circuits of Test Impulse Noise Generators for Electromagnetic Compatibility Calculations

Alexander A. Worshevsky, Petr A. Vorshevskii, Kyaw Myat Thu, Hein Htet Aung

Saint Petersburg State Marine Technical University, Saint Petersburg, Russia

## ABSTRACT

**BACKGROUND:** Marine electronic and electrical equipment may not be supplied to ships unless it meets the impulse noise immunity requirements. Tests of equipment designed without due regard of such requirements record its failures. It is important to be able to predict the effects of noise at the equipment design stage.

**AIM:** To provide mathematical models and circuit simulations of test impulse noise generators to verify the impulse noise immunity of circuits during their development.

**METHODS:** The study is based on the electromagnetic compatibility standards of the Russian Maritime Register of Shipping and IEC 61000-4 standards of the International Electrotechnical Commission. The study uses mathematical descriptions of pulse waveforms and electrical engineering software used to simulate circuits.

**RESULTS:** The study provides formulas describing standard impulse noise, detailed diagrams of test generators used in simulation software, examples of models, and errors of simulated noise parameters.

**CONCLUSION:** The proposed models and simulations allow predicting the effect of noise at the equipment design stage prior to noise immunity tests and reduce the time and cost of equipment modification.

**Keywords:** impulse noise generator; mathematical model; circuit simulation; testing; electromagnetic compatibility.

## To cite this article

Worshevsky AA, Vorshevskii PA, Kyaw MT, Hein HA. Mathematical Models and Circuits of Test Impulse Noise Generators for Electromagnetic Compatibility Calculations. *Transactions of the Saint Petersburg State Marine Technical University*. 2025;4(3):393–400. DOI: 10.52899/24141437\_2025\_03\_393 EDN: UJTAQB

Submitted: 16.03.2025

Accepted: 24.06.2025

Published online: 22.09.2025

## ВВЕДЕНИЕ

Правила Российского морского регистра судоходства, общие стандарты для оборудования промышленного, бытового, специализированного назначения, стандарты на различную продукцию регламентируют требования по устойчивости к импульсным помехам. Электронное и электротехническое оборудование должно проходить испытания на воздействие импульсных помех с определенными стандартными параметрами [1, 2]. Помехи создаются испытательными генераторами, характеристики которых приведены в базовых стандартах по электромагнитной совместимости, соответствующих международным стандартам серии IEC 61000-4. При проектировании и изготовлении различных технических средств важно обеспечить требуемую устойчивость к импульсным помехам, создаваемым испытательными генераторами. Опыт испытаний говорит, что импульсные помехи часто приводит к сбоям в работе

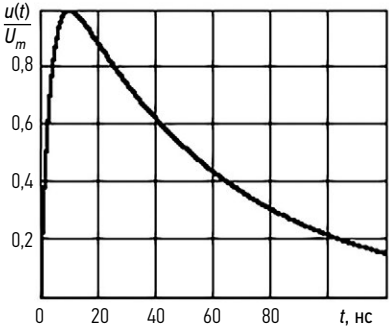
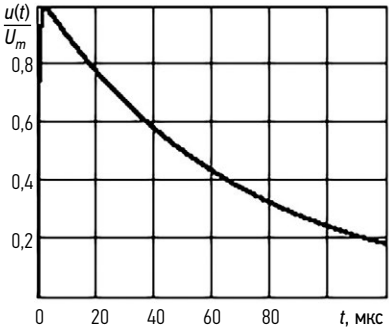
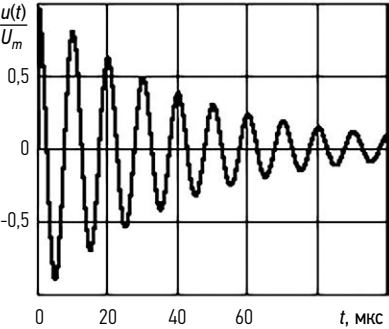
оборудования, спроектированного без учета такого воздействия [3, 4]. На стадии проектирования и создания прототипа оборудования необходимо иметь возможность прогнозировать результат воздействия помех, для чего требуются математические модели помех и модели схем испытательных генераторов, соответствующих базовым стандартам.

## МАТЕМАТИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ ИМПУЛЬСНЫХ ПОМЕХ, ИСПОЛЪЗУЕМЫХ ДЛЯ ИСПЫТАНИЙ ОБОРУДОВАНИЯ

Параметры и формы импульсных помех, создаваемых при проведении испытаний, приведены в табл. 1. В первом столбце даны номера международных стандартов, на основе которых разработаны отечественные стандарты [5–7], а также наименования помех, используемых в России. В скобках приведен дословный перевод названий, применяемых в международных стандартах. Во втором

**Таблица 1.** Требования базовых стандартов, определяющих методику испытаний на устойчивость к импульсным помехам

**Table 1.** Basic standards defining the impulse noise immunity test methods

Стандарт и вид помехи	Форма помехи	Параметры
IEC 61000-4-4 Наносекундные импульсные помехи (Быстрые переходные процессы или пачки).		Амплитуда $U_m=0,5; 1; 2; 4$ кВ+10% Время нарастания (фронт) $t_{\Phi}=5$ нс+30% на уровнях 10–90% от $U_m$ на нагрузке 50 Ом Длительность $t_H=50$ нс +30% по уровню 50% от $U_m$ на нагрузке 50 Ом. Выходное сопротивление 50 Ом
IEC 61000-4-5 Микросекундные импульсные помехи (Выбросы напряжения)		Амплитуда $U_m=0,5; 1; 2; 4$ кВ+10% Время нарастания (фронт) $t_{\Phi}=1$ мкс+30% на уровнях 10–90% от $U_m$ Длительность $t_H=50$ мкс +20% по уровню 50% от $U_m$ на холостом ходу. Выходное сопротивление 2 Ом Параметры тока короткого замыкания генератора $I_m=0,25; 0,5; 1; 2$ кА+10% $t_{\Phi}=6,4$ мкс+30% $t_H=16$ мкс +20%
IEC 61000-4-18 Затухающие колебательные помехи (Затухающие колебательные волны)		Амплитуда $U_m=0,5; 1; 2; 4$ кВ+10% Время нарастания (фронт) $t_{\Phi}=75$ нс+20% на уровнях 10–90% от $U_m$ Частота колебаний $f=0,1$ и 1 МГц +10%. Затухание менее 50% за первые 5 полупериодов и более 50% за 10 полупериодов колебания. Выходное сопротивление 200 Ом



столбце приведена форма создаваемого при испытаниях импульсного напряжения. Амплитуда импульсных помех  $U_m$  регламентируется в требованиях на конкретный вид оборудования по его месту установки, например, для судового оборудования в [1, 2], но выбирается из приведенного в третьем столбце табл. 1 ряда.

Наибольшие значения амплитуды применяются для оборудования, работающего в жесткой электромагнитной обстановке или определяющего безопасность. Указанное время нарастания (длительность фронта) импульсов определяется на уровнях 10–90% от амплитуды, но в стандартах возможно и другое определение этой величины. Необходимо всегда уточнять в нормативном документе как проводится измерение интересующего параметра. Длительность импульса напряжения определяется на уровне 50% от амплитуды.

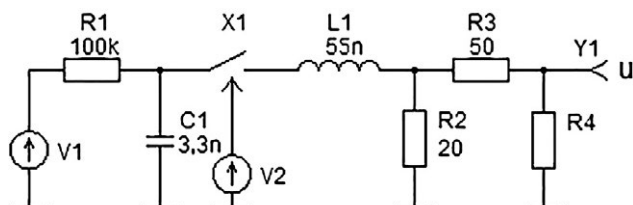
Приведенная в табл. 1 форма импульсных помех по стандартам ГОСТ IEC 61000-4-4-2016 [1], ГОСТ IEC 61000-4-5-2017 [2] может быть описана биэкспоненциальным импульсом:

$$u(t) = E \cdot \left( e^{-\frac{t}{\tau_2}} - e^{-\frac{t}{\tau_1}} \right).$$

Для получения длительности фронта 5 нс, длительности импульса 50 нс и единичной амплитуды импульса  $U_m=1$  по ГОСТ IEC 61000-4-4-2016 следует положить  $E=1,261$ ,  $\tau_1=3,3 \cdot 10^{-9}$  с,  $\tau_2=56 \cdot 10^{-9}$  с.

Для получения длительности фронта 1 мкс, длительности импульса 50 мкс и единичной амплитуды импульса  $U_m=1$  по ГОСТ IEC 61000-4-5-2017 следует положить  $E=1,04$ ,  $\tau_1=0,5 \cdot 10^{-6}$  с,  $\tau_2=68 \cdot 10^{-6}$  с.

ГОСТ IEC 61000-4-5-2017 предусматривает также испытание соединительных линий большой протяженности импульсами напряжения с длительностью фронта 6,5 мкс при длительности импульса 700 мкс. Для получения таких параметров при единичной амплитуде  $U_m=1$  следует положить  $E=1,022$ ,  $\tau_1=3,15 \cdot 10^{-6}$  с,  $\tau_2=983 \cdot 10^{-6}$  с.



**Рис. 1.** Модель испытательного генератора по IEC 61000-4-4.  
**Fig. 1.** Test generator model compliant with IEC 61000-4-4.

Колебательные затухающие помехи по ГОСТ IEC 61000-4-18-2016 [3] описываются выражением:

$$u(t) = E \cdot \left( e^{-\frac{t}{\tau_2}} - e^{-\frac{t}{\tau_1}} \right) \cdot \cos(\omega t).$$

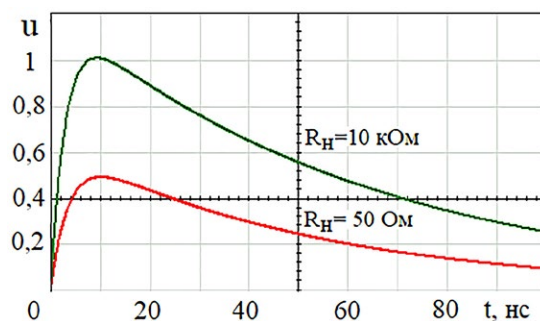
Для получения длительности фронта 75 нс и колебаний с частотой 100 кГц при амплитуде  $U_m=1$  следует положить  $E=1,018$ ,  $\tau_1=37 \cdot 10^{-9}$  с,  $\tau_2=40 \cdot 10^{-6}$  с,  $\omega=2\pi \cdot 100000$ .

## СХЕМЫ ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ ИСПЫТАТЕЛЬНЫХ ГЕНЕРАТОРОВ

Для оценки воздействия импульсных помех, в моделирующих SPICE программах, необходимо иметь схемные модели испытательных генераторов.

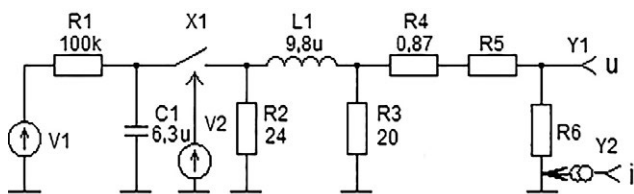
В качестве модели генератора наносекундных импульсных помех по ГОСТ IEC 61000-4-4-2016 предлагается использовать схему, приведенную на рис. 1.

В схеме, набираемой в моделирующей SPICE программе, идеальный источник V1 постоянного напряжения величиной  $E=1,11$  обеспечивает заряд накопительного конденсатора  $C1=3,3$  нФ, который затем разряжается через ключ X1 на цепь  $L1=55$  нГн,  $R2=20$  Ом, формируя на выходе импульс напряжения  $u$  с требуемыми параметрами (рис. 2). Ключ управляется источником V2, который в момент  $t=0$  подает на ключ ступеньку напряжения, изменяющую сопротивление ключа от бесконечности почти до нуля. Резистор  $R3=50$  Ом обеспечивает заданное выходное сопротивление генератора. Резистор  $R4$  является нагрузкой. В режиме близком к холостому ходу при  $R4=10$  кОм амплитуда выходного напряжения равна  $U_m=1$ . При подключении нагрузки  $R4=50$  Ом амплитуда должна уменьшиться в 2 раза. Погрешность значения амплитуды при моделировании не превышает 2,4% при допустимой величине до 10%. Стандартная длительность фронта обеспечивается на нагрузке 50 Ом и на холостом ходу генератора с погрешностью менее 12% при допустимой погрешности 30%.



**Рис. 2.** Изменение напряжения  $u$  на выходе модели испытательного генератора по IEC 61000-4-4 при нагрузке  $R_H=R4$  с сопротивлением 50 Ом и 10 кОм.

**Fig. 2.** Change in voltage  $u$  at the output of the IEC 61000-4-4 test generator model (load:  $R_H = R4$ ; resistance: 50 Ohm and 10 kOhm).



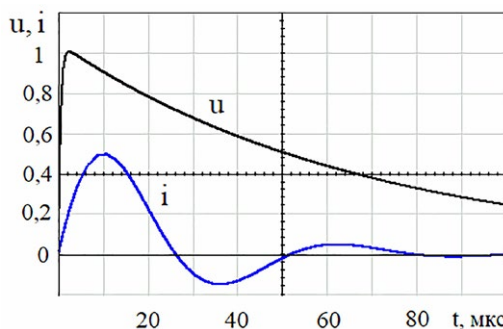
**Рис. 3.** Модель испытательного генератора по IEC 61000-4-5 для длительности 50 мкс.

**Fig. 3.** IEC 61000-4-5 test generator model for 50 μs width.

Длительность импульса также соответствует требованиям стандарта при нагрузке от 50 Ом до 10 кОм с погрешность менее 8%. Для моделирования генератора, создающего заданную амплитуду помехи, необходимо пропорционально изменить напряжение источника V1. Например, для создания помехи с амплитудой 4000 В на холостом ходу необходимо установить  $E=1,11 \cdot 4000=4440$  В.

Генератор микросекундных импульсных помех длительностью 50 мкс по ГОСТ IEC 61000-4-5-2017 моделируется схемой, представленной на рис. 3.

Источник V1 постоянного напряжения величиной  $E=1,03$  обеспечивает заряд накопительного конденсатора  $C1=6,3$  мкФ, который по сигналу управления от источника V2 разряжается через ключ X1 на цепь  $R2=24$  Ом,  $L1=9,8$  мкГн,  $R3=20$  Ом, формируя на выходе импульс напряжения амплитудой  $U_m=1$  (рис. 4). Указанные элементы и резистор  $R4=0,87$  Ом обеспечивают требуемое выходное сопротивление генератора 2 Ом при условии  $R5=0$ . Схема обеспечивает стандартные параметры напряжения холостого хода и тока короткого замыкания генератора. Дополнительный резистор  $R5=10$  Ом



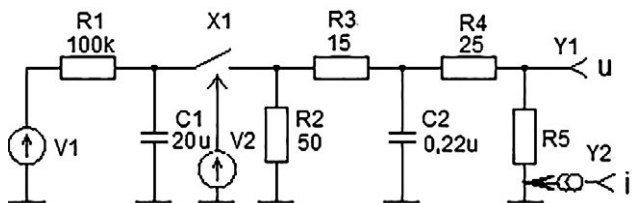
**Рис. 4.** Изменение напряжения  $u$  на выходе модели испытательного генератора 50 мкс по IEC 61000-4-5 на холостом ходу и тока  $I$  при коротком замыкании выхода.

**Fig. 4.** Change in voltage  $u$  at the output of the 50 μs test generator model (IEC 61000-4-5) at idle and current  $I$  during output short circuit.

используется при подаче помех несимметрично в цепи питания и полагается равным  $R5=40$  Ом при вводе помех в линии связи. Резистор R6 изображает нагрузку генератора. Погрешность значения амплитуды напряжения холостого хода и тока короткого замыкания при моделировании не превышает 1%. Длительность фронта и длительность создаваемого импульса соответствует требованиям стандарта с погрешностью менее 5% при допустимой погрешности соответственно 30% и 20%.

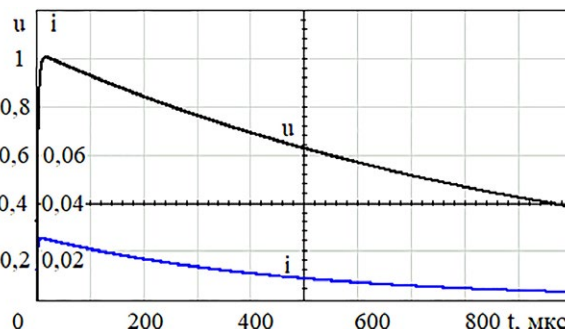
Генератор микросекундных импульсных помех длительностью 700 мкс по ГОСТ IEC 61000-4-5-2017 моделируется схемой на рис. 5.

Источник V1 постоянного напряжения величиной  $E=1,02$  обеспечивает заряд накопительного конденсатора  $C1=20$  мкФ, который по сигналу управления от источника V2 разряжается через ключ X1 на цепь  $R2=50$  Ом,  $R3=15$  Ом,  $C2=0,22$  мкФ, формируя на выходе импульс напряжения амплитудой  $U_m=1$  (рис. 6). Указанные элементы и резистор  $R4=25$  Ом обеспечивают требуемое выходное сопротивление генератора 40 Ом. Схема обеспечивает стандартные параметры



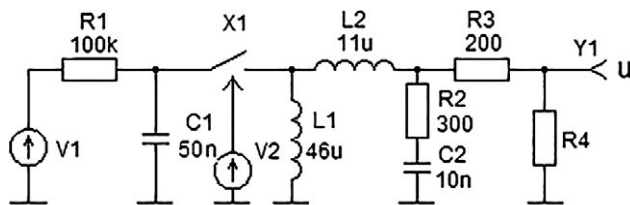
**Рис. 5.** Модель испытательного генератора по IEC 61000-4-5 для длительности 700 мкс.

**Fig. 5.** IEC 61000-4-5 test generator model for 700 μs width.



**Рис. 6.** Изменение напряжения  $u$  на выходе модели генератора импульсов 700 мкс по IEC 61000-4-5 на холостом ходу и тока  $i$  при коротком замыкании выхода.

**Fig. 6.** Change in voltage  $u$  at the output of the 700 μs generator model (IEC 61000-4-5) at idle and current  $I$  during output short circuit.



**Рис. 7.** Модель испытательного генератора по IEC 61000-4-18 для частоты 100 кГц.

**Fig. 7.** IEC 61000-4-18 test generator model for the frequency of 100 kHz.

напряжения холостого хода и тока короткого замыкания генератора. Резистор R5 изображает нагрузку генератора. Погрешность значения амплитуды напряжения холостого хода и тока короткого замыкания при моделировании не превышает 1%. Длительность фронта и длительность создаваемого импульса соответствует требованиям стандарта с погрешностью менее 4% при допустимой погрешности соответственно 30% и 20%.

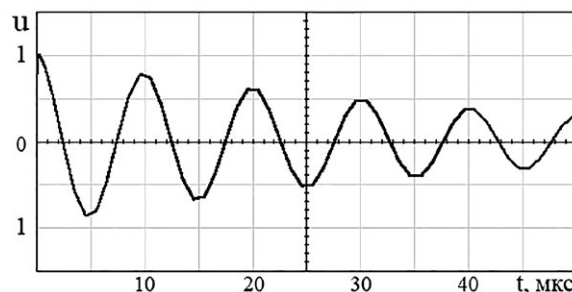
Генератор колебательных затухающих помех с частотой колебаний 100 кГц по ГОСТ IEC 61000-4-18-2016 моделируется схемой на рис. 7.

Заряд и разряд накопительного конденсатора C1 до напряжения  $E=1$  осуществляется аналогично рассмотренному выше. Частота колебаний в основном определяется параметрами элементов  $C1=50$  нФ и  $L1=46$  мкГн, а длительность фронта индуктивностью  $L2=11$  мкГн и резистором  $R2=300$  Ом. Резистор  $R3=200$  Ом определяет требуемое выходное сопротивление генератора. Нагрузка изображается резистором R4. Погрешность значения амплитуды напряжения холостого хода, полученного моделированием по приведенной схеме, не превышает 1%. Длительность фронта и частота колебаний (рис. 8) соответствуют требованиям стандарта с погрешностью менее 4% при допустимой погрешности соответственно 20% и 10%. Для моделирования импульсных помех с амплитудой, отличной от 1 необходимо пропорционально изменить напряжение источника V1.

## ВЫВОДЫ

Импульсные помехи наносекундной, микросекундной длительности способны вызвать сбои в работе различных технических средств. Правила Российского морского регистра судоходства и многочисленные стандарты по электромагнитной совместимости требуют обеспечить устойчивость оборудования к этим видам помех.

Предложенные математические описания импульсных помех и модели схем испытательных генераторов дают возможность моделировать воздействие помех



**Рис. 8.** Изменение напряжения  $u$  на выходе модели генератора колебаний 100 кГц по IEC 61000-4-18.

**Fig. 8.** Change in voltage  $u$  at the output of a 100 kHz oscillator model (IEC 61000-4-18).

на схемы электронного и электротехнического оборудования на стадии проектирования для предварительной оценки его соответствия требованиям по электромагнитной совместимости.

## ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ИНФОРМАЦИЯ

**Вклад авторов.** Представленная статья является коллективным трудом авторов и охватывает анализ нормативной документации, разработку математического описания стандартных импульсных помех, разработку схем, имитирующих помехи, проверку моделей, оценку погрешностей.

**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.

**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 INFORMATION

**Author contributions:** All authors made substantial contributions to the conceptualization, investigation, and manuscript preparation, and reviewed and approved the final version prior to publication.

**Funding sources:** No funding.

**Disclosure of interests:** The authors have no relationships, activities, or interests for the last three years related to for-profit or not-for-profit third parties whose interests may be affected by the content of the article.

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

**Provenance and peer review:** This paper was submitted unsolicited and reviewed following the standard procedure. The peer review process involved one external reviewer, a member of the editorial board, and the in-house scientific editor.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Правила классификации и постройки морских судов, Часть XI «Электрическое оборудование», НД № 2-020101-174, Российский морской регистр судоходства, СПб, 2025.
2. ГОСТ Р МЭК 60945-2007. Морское навигационное оборудование и средства радиосвязи. Общие требования. Методы испытаний и требуемые результаты испытаний. Стандартиформ, М., 2009.
3. Агафонов А.М., Воршевский А.А., Воршевский П.А., Гришаков Е.С., Корнев А.С. Обеспечение электромагнитной совместимости систем интеллектуального управления при появлении помех в судовых кабельных трассах. *Морские интеллектуальные технологии*. 2020. № 1-3 (47), с 115-120.
4. Воршевский А.А., Гальперин В.Е. Электромагнитная совместимость судовых технических средств. СПб.: СПбГМТУ, 2010. С. 317.
5. ГОСТ IEC 61000-4-4-2016. Электромагнитная совместимость (ЭМС). Часть 4-4. Методы испытаний и измерений. Испытание на устойчивость к электрическим быстрым переходным процессам (пачкам). М.: Стандартиформ, 2016.
6. ГОСТ IEC 61000-4-5-2017. Электромагнитная совместимость (ЭМС). Часть 4-5. Методы испытаний и измерений. Испытание на устойчивость к выбросу напряжения. М.: Стандартиформ, 2017.
7. ГОСТ IEC 61000-4-18-2016. Электромагнитная совместимость (ЭМС). Часть 4-18. Методы испытаний и измерений. Испытание на устойчивость к затухающей колебательной волне. М.: Стандартиформ, 2016.

## REFERENCES

1. ND № 2-020101-174. Pravila klassifikacii i postrojki morskikh sudov, Chast' XI «Elektricheskoe oborudovanie». Saint Petersburg: Rossijskij morskij registr sudohodstva; 2025. (In Russ.)
2. GOST R IEC 60945-2007. Morskoe navigacionnoe oborudovanie i sredstva radiosvyazi. Obshchie trebovaniya. Metody ispytaniy i trebuemye rezul'taty ispytaniy. Moscow: Standartinform; 2009. (In Russ.)
3. Agafonov AM, Worshevsky AA, Vorshevskij PA, et al. Ensuring electromagnetic compatibility of intelligent control systems when interference occurs in ship cable routes. *Morskie intellektual'nye tekhnologii*. 2020;1-3(47):115-120. doi: 10.37220/MIT.2020.47.1.072 EDN: GXVXOJ
4. Worshevskij AA, Galperin VE. *Electromagnetic compatibility of ship technical equipment*. Saint Petersburg: SPbGMTU; 2010.
5. GOST IEC 61000-4-4-2016. Electromagnetic compatibility (EMC) – Part 4-4: Testing and measurement techniques. Electrical fast transient/burst immunity test. Moscow: Standartinform; 2016. (In Russ.)
6. GOST IEC 61000-4-5-2017. Electromagnetic compatibility (EMC) – Part 4-5: Testing and measurement techniques. Surge immunity test. Moscow: Standartinform; 2017. (In Russ.)
7. GOST IEC 61000-4-18-2016. Electromagnetic compatibility (EMC) – Part 4-18: Testing and measurement techniques. Damped oscillatory wave immunity test. Moscow: Standartinform; 2016. (In Russ.)

## ОБ АВТОРАХ

### \* Воршевский Александр Алексеевич,

д-р техн. наук, доцент, заведующий кафедрой электротехники и электрооборудования судов, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет; адрес: Россия, 190121, Санкт-Петербург, ул. Лоцманская, д. 3; eLibrary SPIN: 6357-8486; e-mail: elemcom@smtu.ru

### Воршевский Петр Александрович,

канд. техн. наук, доцент кафедры электротехники и электрооборудования судов, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет; eLibrary SPIN: 9819-0704; e-mail: petekw@rambler.ru

## AUTHORS' INFO

### \* Alexander A. Worshevsky,

Dr. Sci. (Engineering), Associate Professor, Head of the Department of Electrical Engineering and Electrical Equipment of Ships, Saint Petersburg State Marine Technical University; address: 3 Lotsmanskaya st, Saint Petersburg, Russia, 190121; eLibrary SPIN: 6357-8486; e-mail: elemcom@smtu.ru

### Petr A. Vorshevskii,

Cand. Sci. (Engineering), Associate Professor of the Department of Electrical Engineering and Electrical Equipment of Ships, Saint Petersburg State Marine Technical University, eLibrary SPIN: 9819-0704; e-mail: petekw@rambler.ru

**Киав Мьят Тху,**

аспирант кафедры электротехники и электрооборудования судов, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет;  
e-mail: kyawhsu314@gmail.com

**Хейн Хтет Аунг,**

аспирант кафедры электротехники и электрооборудования судов, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет;  
e-mail: heinhtetaung5338@gmail.com

**Kyaw Myat Thu,**

graduate student of the Department of Electrical Engineering and Electrical Equipment of Ships, Saint Petersburg State Marine Technical University;  
e-mail: kyawhsu314@gmail.com

**Hein Htet Aung,**

graduate student of the Department of Electrical Engineering and Electrical Equipment of Ships, Saint Petersburg State Marine Technical University;  
e-mail: heinhtetaung5338@gmail.com

---

\* Автор, ответственный за переписку / Corresponding author

Оригинальное исследование

УДК 51-7:621.396

DOI: [https://doi.org/10.52899/24141437\\_2025\\_03\\_401](https://doi.org/10.52899/24141437_2025_03_401)

EDN: LAWNRQ

# Выявление аномалий при анализе результатов гидроакустических измерений нестационарных процессов

Е.К. Самаров

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

## АННОТАЦИЯ

**Актуальность.** При обработке результатов гидроакустических измерений огромное значение имеет выявления и отбраковка так называемых аномальных результатов. Это связано с тем, что даже один результат, может привести к ложным выводам. Отличительными особенностями измерений в области гидроакустики являются, с одной стороны, высокая цена просчета в случае недостаточной их точности, а с другой — трудность достижения необходимой точности ввиду сложности и изменчивости среды распространения, влияния фона. Необходимость знания тонкой пространственной и временной структуры измеряемых гидроакустических нестационарных процессов предъясняет жесткие дополнительные требования к используемым методам и средствам измерений, а также к точности получаемых результатов. В предлагаемой статье рассмотрены и проанализированы вопросы, связанные с выявлением аномалий при анализе результатов гидроакустических измерений случайных нестационарных процессов на основе метода размножения оценок.

**Цель работы** — разработка алгоритма обнаружения аномальных значений результатов измерений стационарного и для нестационарного процесса основанного на методе размножения оценок.

**Методы.** Для нахождения оптимальных значений параметров предлагаемых алгоритмов исследовали зависимости вероятности правильного обнаружения и вероятность ложной тревоги в зависимости от числа размноженных оценок исходной реализации и числа покрытий на длину реализации. Было показано, что в условиях ограниченных априорных данных использование указанного метода позволяет эффективно определять аномальные значения результатов гидроакустических измерений не только для стационарного, но и для нестационарного процессов.

**Результаты.** Воспользовавшись имитационным моделированием, были получены модели результатов измерения, которые представляли собой нестационарную случайную последовательность. Проведенные исследования показали высокую эффективность обнаружения аномальных измерений предлагаемого алгоритма, основанного на методе размножения оценок. Высокая эффективность предлагаемого алгоритма в условиях ограниченных априорных данных позволяет его использовать в автоматизированных системах первичной обработки данных.

**Ключевые слова:** гидроакустические измерения; размножение оценок; аномальные измерения.

## Как цитировать

Самаров Е.К. Выявление аномалий при анализе результатов гидроакустических измерений нестационарных процессов // Труды Санкт-Петербургского государственного морского технического университета. 2025. Т. 4, № 3. С. 401–406. DOI: 10.52899/24141437\_2025\_03\_401 EDN: LAWNRQ

Original Study Article

DOI: [https://doi.org/10.52899/24141437\\_2025\\_03\\_401](https://doi.org/10.52899/24141437_2025_03_401)

EDN: LAWNRQ

# Identification of Anomalies in Analysis of Hydroacoustic Measurements of Unsteady Processes

Evgeny K. Samarov

Saint Petersburg State Marine Technical University, Saint Petersburg, Russia

## ABSTRACT

**BACKGROUND:** When processing hydroacoustic measurements, it is very important to identify and reject the so-called abnormal results as even one result can lead to false inference. The distinctive features of hydroacoustic measurements are, on the one hand, the high cost of errors in case of low accuracy and on the other hand, the difficulty of achieving the required accuracy due to the complexity and variability of the propagation medium and the background effect. The need to know the fine spatial and temporal structure of the measured hydroacoustic unsteady processes imposes additional strict requirements to the measurement methods and tools and their accuracy. The paper discusses and analyzes the issues related to the detection of anomalies in the analysis of hydroacoustic measurements of random non-stationary processes using the method of multiplication of estimates.

**AIM:** To develop an algorithm for detecting abnormal measurements for stationary and non-stationary processes based on the method of multiplication of estimates.

**METHODS:** To find the optimal parameter values of the proposed algorithms, we studied the relationship between the probability of correct detection and the probability of a false alarm and the number of multiplied estimates of the initial implementation and the number of covers per implementation length. It has been shown that in conditions of limited a priori data, this method allows to effectively determine the anomalous hydroacoustic measurements both for stationary and non-stationary processes.

**RESULTS:** Using simulation modeling, we built models of measurements represented by a non-stationary random sequence. The studies have shown the high efficiency of detecting abnormal measurements of the proposed algorithm based on the method of multiplication of estimates. The high performance of the proposed algorithm in conditions of limited a priori data allows for its use in automated primary data processing systems.

**Keywords:** hydroacoustic measurements; multiplication of estimates; anomalous measurements.

## To cite this article

Samarov EK. Identification of Anomalies in Analysis of Hydroacoustic Measurements of Unsteady Processes. *Transactions of the Saint Petersburg State Marine Technical University*. 2025;4(3):401–406. DOI: [10.52899/24141437\\_2025\\_03\\_401](https://doi.org/10.52899/24141437_2025_03_401) EDN: LAWNRQ

Submitted: 16.04.2025

Accepted: 24.06.2025

Published online: 22.09.2025

## ВВЕДЕНИЕ

Россия традиционно относится к числу ведущим морских держав, играющих активную роль в изучении, освоении и использовании Мирового океана в интересах народного хозяйства и обеспечения обороноспособности страны. Основными источниками информации об обстановке в морской среде являются гидроакустические измерения [1–3].

Отличительными особенностями измерений в области гидроакустики являются, с одной стороны, высокая цена просчета в случае недостаточной их точности, а с другой — трудность достижения необходимой точности ввиду сложности и изменчивости среды распространения, влияния фона. Необходимость знания тонкой пространственной и временной структуры измеряемых гидроакустических нестационарных процессов предъявляет жесткие дополнительные требования к используемым методам и средствам измерений, а также к точности получаемых результатов.

На практике, в большинстве случаев, трудность обработки исходных данных заключается в отсутствии априорной информации о характеристиках случайного процесса [4–6]. Решить задачу обнаружения аномалий при априорной неопределенности аналитически довольно сложно. Чаще всего это сделать просто невозможно.

Рассмотрим и проанализируем метод обнаружения аномальных измерений, основанный на методе размножения оценок [7, 8].

## МЕТОД РАЗМНОЖЕНИЯ ОЦЕНОК (МРО)

Пусть на вход измерительной системы поступает нестационарный случайный процесс  $y(t)$  в виде суммы полезного сигнала  $s(t)$  (функция тренда), аномальных измерений  $\varepsilon_{ан}(t)$  и шумовой составляющей  $\varepsilon_{ш}(t)$ :

$$y(t) = s(t) + \varepsilon_{ан}(t) + \varepsilon_{ш}(t). \quad (1)$$

Алгоритм обнаружения аномальных измерений должен обладать не только высокой эффективностью по отношению к обнаружению сбоев, но и требовать минимальное количество априорных данных о характеристиках полезного сигнала и аддитивного шума.

Усреднив по ансамблю размноженные значения оценочной функции измеряемого процесса, можно очистить исходные данные от шумовой составляющей [7, 8].

Предлагаемый метод обнаружения аномальных измерений основывается на использовании МРО.

На каждом интервале (покрытии) исходной реализации, используя метод наименьших квадратов (полиномом не выше 2-й степени), проводят аппроксимацию и находят разность

$$\Delta(t_i) = y(t_i) - s(t_i),$$

после чего для  $\Delta(t_i)$  проводят ранжирование. При вычислении средней квадратической погрешности  $\sigma$  ранжированного ряда из рассмотрения исключают крайние значения, при этом

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{m-1} \sum_{i=1}^m \Delta(t_i)^2},$$

где  $m = N - 2$ ;  $N$  — число отсчетов на покрытие.

Затем устанавливается порог  $\varepsilon = A\sigma$ , ( $0 < A \leq 3$ ), превышение которого штрафует разностным процессом, т.е. если

$$s(t_i) + \varepsilon < y(t_i) - \varepsilon, \quad (2)$$

то  $y(t_i)$  получает одно штрафное значение, равное 1.

Процедура определения штрафов повторяется для каждой из размноженных оценок исходной реализации.

Аномальными считаются отсчеты, у которых суммарное число штрафов превышает среднее значение.

Воспользовавшись имитационным моделированием, были получены модели результатов измерения, которые представляли собой нестационарную случайную последовательность. В свою очередь случайная составляющая включала в себя значения аномального характера (сбои). Амплитуда аномальных значений на протяжении всей выборки приняты постоянными и положительными. Положение сбоев в реализации, их количество и амплитуду варьировали в зависимости от характера исследований.

При использовании алгоритма по эффективности обнаружения аномальных значений модель представляла собой выборку стационарного гауссовского шума объемом 100 отсчетов, в которой содержалось десять аномальных значений амплитудой  $20\sigma^2$ , расположенных по выборке равномерно в начале, середине и в конце выборки.

Предложенная методика имеет недостаток: значение порога  $\varepsilon = A\sigma$  зависит от  $\sigma$ , где  $A \in R$ ,  $R$  — множество всех действительных чисел. Для устранения этого недостатка предлагается ввести адаптацию по  $\varepsilon$ .

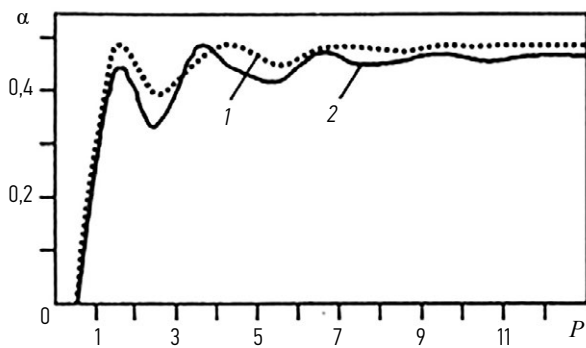
При фиксированном уровне значимости  $\alpha \leq 0,01$ , где  $\alpha$  — вероятность ложной тревоги, экспериментально найдена зависимость

$$\varepsilon(\sigma) = 26,847\sigma - 0,5565.$$

Для нахождения оптимальных значений параметров предлагаемых алгоритмов исследовали зависимость вероятности правильного обнаружения  $\beta = f(P)$ ,  $\beta = f(R)$  и вероятность ложной тревоги  $\alpha = f(P)$ ,  $\alpha = f(R)$ , от числа размноженных оценок исходной реализации  $P$  и числа покрытий на длину реализации  $R$ .

На рис. 1 представлены вероятности ложной тревоги от числа размножений  $\alpha(P)$  при фиксированном пороге обнаружения аномальных измерений и аппроксимации полиномом первой (кривая 1) и второй (кривая 2) степени





**Рис. 1.** Зависимости вероятности ложной тревоги от числа размножений  $\alpha(P)$ .

**Fig. 1.** Relationship between the probability of false alarm and the number of multiplications  $\alpha(P)$ .

При использовании адаптации по порогу обнаружения значение вероятности ложной тревоги  $\alpha = f(P)$  уменьшается в среднем в 100 раз. Полученные зависимости являются результатом усреднения по 1000 реализаций.

На рис. 2 приведены зависимости вероятности правильного обнаружения  $\beta = f(P)$  при адаптивном пороге обнаружения (кривые 1, 2) и неадаптивном (кривые 3, 4).

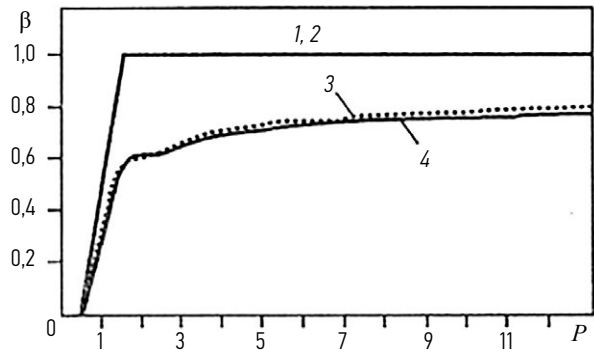
Кривые 1, 3 получены при аппроксимации на каждом покрытии полиномом 1-й степени, а графики 2, 4 — 2-й.

Сравнительный анализ результатов показывает, что при введении адаптации по порогу обнаружения аномальных значений удалось снизить уровень  $\alpha$  в среднем в 100 раз. При этом уровень  $\beta$  снизился только на 20–30%.

Необходимо отметить, что увеличение числа размножений  $P > 7$  не приводит к значительному росту  $\beta$ , а значения  $\alpha$  несколько возрастают. В связи с этим в качестве оптимального значения числа размножения оценок предлагаемого алгоритма следует принять  $P = 7$ .

Совместный анализ зависимостей  $\beta = f(R, P)$  и  $\alpha = f(R, P)$  показал, что в сечении графиков  $P = 7$  для предлагаемого алгоритма оптимальное значение  $R = 10$ .

Методика, использующая адаптацию по порогу обнаружения, имеет ряд существенных преимуществ



**Рис. 2.** Зависимости вероятности правильного обнаружения от числа размножений  $\beta(P)$ .

**Fig. 2.** Relationship between the probability of correct detection and the number of multiplications  $\beta(P)$ .

по сравнению с фиксированным порогом обнаружения. Однако основным недостатком по-прежнему остается зависимость от  $\sigma$ , т.к.  $\sigma$  нельзя достаточно точно определить при малых объемах выборок.

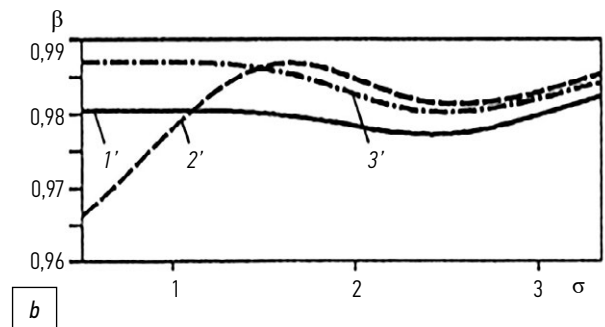
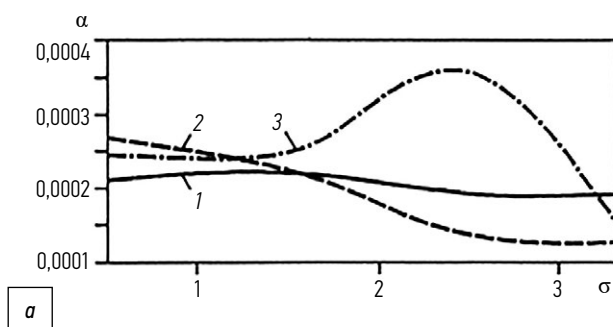
Отказаться от нахождения уровня дисперсии можно так. Для  $\Delta(t_i)$  на каждом покрытии определяется максимальное значение и устанавливается порог  $\varepsilon = Ay_{\max}(t)$  (где  $0 < A \leq 1$ ), превышение которого штрафуются. То есть, если

$$y(t_i) > \varepsilon, \quad (3)$$

то  $y(t_i)$  получает одно штрафное значение, равное 1.

При этом для элементов исходной реализации, при выполнении условия (3), происходит накопление значений штрафов. По окончании обработки для всех оштрафованных значений строится плотность распределения вероятностей штрафов, по которой и определяют какие из измерений являются аномальными.

С помощью имитационного моделирования были проведены сравнительные исследования адаптивного алгоритма обнаружения аномальных измерений и метода обнаружения аномальных измерений на базе МРО при одних и тех же параметрах ( $P = 7$  и  $R = 10$ ).



**Рис. 3.** Зависимости вероятностей  $\alpha$  (a) и  $\beta$  (b) от среднеквадратической погрешности  $\sigma$  для алгоритма с адаптивным порогом без сигнала (1, 1'), при экспоненциальном (2, 2') и синусоидальном (3, 3') полезных сигналах.

**Fig. 3.** Relationships between probabilities  $\alpha$  (a) and  $\beta$  (b) and the mean square error  $\sigma$  for the adaptive threshold algorithm without a signal (1, 1'), with exponential (2, 2') and sinewave (3, 3') desired signals.

На рис. 3. приведены кривые 1–3 для зависимости  $\alpha(\sigma)$  и кривые 1'–3' для зависимости  $\beta(\sigma)$  для алгоритма с адаптивным порогом обнаружения, где  $\sigma$  принимает значения 0,05; 0,1; 0,15; 0,2 при различных видах функций  $s(t)$ ; шумовая составляющая имела равномерный закон распределения.

Из анализа результатов, показанных на рис. 3, следует, что последний из предложенных алгоритмов (третий) по сравнению с предыдущими является наиболее эффективным. Повышение эффективности наблюдается при оценивании как  $\alpha$ , так и  $\beta$ , что связано с использованием способа размножения единственной реализации исходного процесса и принятия решения об измерениях при сбое не по порогу, а по плотности штрафных значений.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенные исследования показали высокую эффективность обнаружения аномальных измерений предлагаемого алгоритма, основанного на методе размножения оценок. Использование этого метода в качестве основы реализации предлагаемого алгоритма обнаружения позволило эффективно определять аномальные значения результатов измерений не только для стационарного, но и для нестационарного процесса. Высокая эффективность предлагаемого алгоритма в условиях ограниченных априорных данных позволяет его использовать в автоматизированных системах первичной обработки данных.

## ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ИНФОРМАЦИЯ

**Вклад авторов.** Автор несет ответственность за все аспекты работы, гарантируя надлежащее рассмотрение и решение вопросов, связанных с точностью и добросовестностью любой её части.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Акустика океана. Ред. Дж. Де Санто. М.: Мир, 1982.
2. Ольшанский В.В. Статистические методы в гидролокации. (Модели, алгоритмы, решения). Л.: Судостроение, 1983.
3. Фирсов Ю.Г. Основы гидроакустики и использования гидрографических сонаров. СПб.: Нестор-История, 2010.
4. Артюшенко В.М., Воловач В.И. Нелинейное оценивание параметров сигнала при воздействии узкополосных негауссовских помех // Автотририя. 2019. Т. 55, № 1. С. 80–88. doi: 10.15372/AUT20190111 EDN: YWSQOL
5. Артюшенко В.М., Воловач В.И. Оценка погрешности измерения векторного информационного параметра сигнала на фоне

**Источники финансирования.** Автор заявляет об отсутствии внешнего финансирования при проведении исследования.

**Конфликт интересов.** Автор декларирует 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 использовались.

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

## ADDITIONAL INFORMATION

**Author contributions:** The author approved the version of the manuscript to be published and agrees to be accountable for all aspects of the work, ensuring that issues related to the accuracy or integrity of any part of the work are appropriately investigated and resolved.

**Funding sources:** No funding.

**Disclosure of interests:** The authors have no relationships, activities, or interests for the last three years related to for-profit or not-for-profit third parties whose interests may be affected by the content of the article.

**Statement of originality:** No previously obtained or published material (text, images, or data) was used in this study or article.

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

**Provenance and peer review:** This paper was submitted unsolicited and reviewed following the standard procedure. The peer review process involved one reviewer, a member of the editorial board, and the in-house scientific editor.

мультипликативных помех // Радиотехника. 2016. № 2. С. 72–82. EDN: VPKHLZ

6. Фомин А.Ф., Новоселов О.Н., Плющев А.В. Отбраковка аномальных результатов измерений. М.: Энергоатомиздат, 1985.

7. Свидетельство регистрации программы № 20003610367 / 12.02.2003. Марчук В.И., Шерстобитов А.И. Выделение аномальных измерений в автоматизированных системах первичной обработки информации: Рег. номер программы.

8. Переверткин С.М., Кантор А.В., Бородин Н.Ф., Щербакова Т.С. Бортовая телеметрическая аппаратура космических летательных аппаратов. М.: Машиностроение, 1977.

## REFERENCES

1. *Acoustics of the ocean*. Ed. J De Santo. Moscow: Mir; 1982. (In Russ.)
2. Olshansky VV. *Statistical methods in sonar. (Models, algorithms, solutions)*. Leningrad: Sudostroenie; 1983. (In Russ.)
3. Firsov YuG. *Fundamentals of hydroacoustics and the use of hydrographic sonars*. St. Petersburg: Nestor-Istoriya; 2010. (In Russ.)
4. Artyushenko VM, Volovach VI. Nonlinear estimation of signal parameters under the influence of narrow-band non-Gaussian interference. *Avtometriya*. 2019;55(1):80–88. (In Russ.)
5. Artyushenko VM, Volovach VI. Estimation of the measurement error of the vector information parameter of the signal against the background of multiplicative interference. *Radio Engineering*. 2016;2:72–82. (In Russ.) EDN: VPKHLZ

6. Fomin AF, Novoselov ON, Plushev AV. *Rejection of abnormal measurement results*. Moscow: Energoatomizdat, 1985. (In Russ.)
7. Certificate Registration Program № 20003610367 / 12.02.2003. Marchuk VI, Sherstobitov AI. Identification of abnormal measurements

- in automated primary information processing systems: Reg. program number (In Russ.)
8. Perevertkin SM, Kantor AV, Borodin NF, Shcherbakova TS. *On-board telemetry equipment of space aircraft*. Moscow: Mashinostroenie; 1977. (In Russ.)

## ОБ АВТОРЕ

### Самаров Евгений Кимович,

д-р техн. наук, декан факультета естественных наук,  
Санкт-Петербургский государственный морской  
технический университет;  
адрес: Россия, 190121, Санкт-Петербург, ул. Лоцманская, 3;  
eLibrary SPIN: 1077-2126;  
e-mail: omega511@mail.ru

## AUTHOR INFO

### Evgeny K. Samarov,

Dr. Sci. (Engineering), Dean of the Faculty of Natural Sciences,  
Saint Petersburg State Marine Technical University;  
address: 3 Lotsmanskaya st, Saint Petersburg, Russia, 190121;  
eLibrary SPIN: 1077-2126;  
e-mail: omega511@mail.ru

Оригинальное исследование

УДК 537.242

DOI: [https://doi.org/10.52899/24141437\\_2025\\_03\\_407](https://doi.org/10.52899/24141437_2025_03_407)

EDN: BGRVLZ

# Компьютерное моделирование воздействия электростатического разряда в частотной области

Р.Я. Низкий

Крыловский государственный научный центр, Санкт-Петербург, Россия;  
Санкт-Петербургский государственный морской технический университет, Санкт-Петербург, Россия

## АННОТАЦИЯ

**Актуальность.** Актуальность работы обусловлена необходимостью создания средств компьютерного моделирования, позволяющих оценивать результат воздействия электромагнитных помех на блоки аппаратуры на стадии проектирования.

**Цель работы.** Установить возможность применения вычислительных методов частотной области для моделирования переходных процессов, возникающих при воздействии электростатического разряда на блоки аппаратуры.

**Материалы и методы.** В работе предлагается для моделирования стандартизованных воздействий электростатических разрядов на блоки аппаратуры использовать метод поверхностных интегральных уравнений в частотной области. Для этого к стандартизованному току разряда применяется быстрое преобразование Фурье и методами частотной области моделируется воздействие сосредоточенного источника гармонического тока для ряда частот. Для каждой частоты определяется коэффициент преобразования воздействия в помеху. Временные зависимости наведенных электростатическим разрядом напряжений и токов получаются в результате обратного быстрого преобразования Фурье, примененного к произведению спектра тока разряда и соответствующего коэффициента преобразования.

**Результаты.** Результаты, полученные с помощью методов частотной области и методов временной области, совпадают с достаточной для практических расчетов точностью. При этом воздействие каждой частотной составляющей анализируется независимо, что допускает высокую степень параллелизации вычислений, в то время как расчет методами временной области требует завершения расчетов для предшествующих моментов времени. Требования к размеру элементов расчетной сетки определяются длиной волны на максимальной учитываемой частоте.

**Заключение.** В работе показана принципиальная возможность использования методов частотной области для моделирования импульсных электромагнитных воздействий, таких как воздействие электростатического разряда. Частотные зависимости коэффициентов преобразования и спектральной плотности помех предоставляют дополнительную информацию о связи уровней помех с геометрией блоков аппаратуры и о возможных путях их снижения.

**Ключевые слова:** электростатический разряд; компьютерное моделирование; поверхностные интегральные уравнения; численные методы частотной области; электромагнитная совместимость; спектральная плотность; быстрое преобразование Фурье.

## Как цитировать

Низкий Р.Я. Компьютерное моделирование воздействия электростатического разряда в частотной области // Труды Санкт-Петербургского государственного морского технического университета. 2025. Т. 4, № 3. С. 407–412. DOI: [10.52899/24141437\\_2025\\_03\\_407](https://doi.org/10.52899/24141437_2025_03_407) EDN: BGRVLZ

Original Study Article

DOI: [https://doi.org/10.52899/24141437\\_2025\\_03\\_407](https://doi.org/10.52899/24141437_2025_03_407)

EDN: BGRVLZ

# Computer Simulation of Effects of Electrostatic Discharge in Frequency Domain

Roman Ya. Nizkiy

Krylov State Research Centre, Saint Petersburg, Russia;  
Saint Petersburg State Marine Technical University, Saint Petersburg, Russia

## ABSTRACT

**BACKGROUND:** There's a need to develop computer modeling tools that allow assessing the effect of electromagnetic interference on equipment units at the design stage.

**AIM:** To determine the possibility of using frequency domain computational methods to simulate transient processes, when an electrostatic discharge affects equipment units.

**METHODS:** The paper proposes to use surface integral equations in the frequency domain to model standardized effects of electrostatic discharges on equipment units. For this, the fast Fourier transform is applied to the standardized discharge current and the effect of a lumped harmonic current source for a frequency sequence is modeled using frequency domain methods. The effect-to-interference conversion factor is determined for each frequency. The time dependences of the voltages and currents induced by electrostatic discharge are determined by the inverse fast Fourier transform applied to the product of the discharge current spectrum and the corresponding conversion factor.

**RESULTS:** The results obtained by the proposed frequency domain methods match the results of time domain methods with a reasonable degree of accuracy for practical calculations. In this case, the effect of each frequency component is analyzed independently, allowing for a high degree of parallelization of calculations; whereas calculations using time domain methods require completed calculations for previous time points. Requirements to the size of mesh elements are determined by the wavelength at the maximum frequency used.

**CONCLUSION:** The paper demonstrates the fundamental possibility of using frequency domain methods to model pulsed electromagnetic effects, including the effect of electrostatic discharge. Frequency dependences of the conversion factors and the spectral density of interference provide additional information on the relationship between interference levels and the geometry of equipment units and possible ways to reduce them.

**Keywords:** electrostatic discharge; computer simulation; surface integral equations; computational frequency domain methods; electromagnetic compatibility; spectral density; fast Fourier transform.

## To cite this article

Nizkiy RYa. Computer Simulation of Effects of Electrostatic Discharge in Frequency Domain. *Transactions of the Saint Petersburg State Marine Technical University*. 2025;4(3):407–412. DOI: 10.52899/24141437\_2025\_03\_407 EDN: BGRVLZ

Submitted: 12.05.2025

Accepted: 27.06.2025

Published online: 22.09.2025

## ВВЕДЕНИЕ

Электростатический разряд (ЭСР) является часто встречающимся видом непреднамеренных электромагнитных воздействий, которые могут привести к временным сбоям в работе или выходу из строя аппаратуры. Обычно ЭСР происходит при приближении человека с накопленным электрическим зарядом к блоку аппаратуры на расстояние, достаточное для возникновения разряда между проводящими частями блока и телом человека или металлическим предметом в его руках. Импульсный ток, возникающий при разряде и растекающийся по проводникам блока аппаратуры, создает электромагнитное поле, которое может негативно влиять на микроэлектронные компоненты. Параметры импульсного тока зависят от условий эксплуатации аппаратуры, например, от относительной влажности воздуха и от материалов, с которыми соприкасается человек. Для унификации методов испытаний на устойчивость к ЭСР и испытательного оборудования, в действующих стандартах [1, 2] зафиксированы формы разрядных токов.

На распределение токов ЭСР по проводникам блоков аппаратуры и электромагнитных полей внутри блоков влияет геометрия элементов блоков и электромагнитные свойства материалов, из которых они изготовлены. Современные средства автоматического проектирования и методы вычислительной электродинамики дают возможность предсказывать результат воздействия ЭСР на аппаратуру с помощью компьютерного моделирования на этапе проектирования до изготовления и испытания аппаратуры. Традиционно для компьютерного моделирования воздействия ЭСР с учетом геометрии аппаратуры используются методы временной области, в которых электромагнитные поля рассчитываются последовательно для ряда моментов времени. К таким методам относится метод конечного интегрирования (FIT) [3, 4], метод конечных разностей во временной области (FDTD) [5, 6] и метод конечных элементов, реализованный, например, в среде моделирования [7].

Кроме того, воздействие тока ЭСР можно рассчитать методами частотной области. В этом случае необходимо аппроксимировать стандартную форму тока суммой конечного числа синусоидальных токов различных частот и провести анализ воздействия для каждой из частот, что позволит уменьшить число элементов, на которые разбивается геометрия модели и предоставит дополнительную информацию о связи уровней помех с геометрией блоков аппаратуры. Подобный подход использовался в [8] для моделирования влияния коронного разряда на антенны самолетов.

## ОПИСАНИЕ МЕТОДОВ РЕШЕНИЯ

Пусть импульсный ток ЭСР задается функцией  $i(t)$  от времени  $t$ . Обозначим через  $i_n$  значения тока  $i(t_n)$

в моменты времени  $t_n = n\tau$ ,  $n = 0, \dots, N - 1$ , где  $\tau$  — шаг дискретизации по времени,  $N$  — число отсчетов. Применяя к последовательности  $i_n$  дискретное преобразование Фурье, получаем последовательность комплексных величин

$$I_k = \sum_{n=0}^{N-1} i_n e^{-\frac{2\pi j}{N} kn}, \quad (1)$$

где  $j$  — мнимая единица. Для  $k = 0, \dots, N/2$  величины  $I_k$  пропорциональны комплексным амплитудам спектральных составляющих  $i(t)$ , соответствующих частотам

$$f_k = \frac{k}{N\tau}. \text{ Для } k = N/2 + 1, \dots, N - 1 \text{ выполняется}$$

соотношение

$$I_k = (I_{N-k})^*, \quad (2)$$

где знак  $*$  обозначает комплексное сопряжение.

Далее для каждой частоты  $f_k$ ,  $k = 0, \dots, N/2$  численными методами частотной области определяем результат воздействия на исследуемый объект гармонического источника тока с амплитудой 1 А. Если исследуемый объект состоит преимущественно из тонких проводящих поверхностей, достаточно использовать поверхностное интегральное уравнение электрического поля (ИУЭП) [9]. При необходимости учета магнитных свойств материалов решается система из ИУЭП и интегрального уравнения магнитного поля [10]. Для включения в модель диэлектрических объемных элементов, поверхностные интегральные уравнения обобщаются до объемно-поверхностных интегральных уравнений [11, 12].

В каждом из упомянутых интегральных уравнений неизвестными функциями являются распределения токов (токов проводимости для проводников, токов смещения для диэлектриков, магнитных токов для магнитных материалов). Геометрия модели разбивается на треугольные и тетраэдральные элементы (только те части, на которых индуцируется ток). Токи аппроксимируются линейной комбинацией базисных функций, каждая из которых определена на двух или большем числе треугольников и тетраэдров. Для сведения интегральных уравнений к системе линейных алгебраических уравнений (СЛАУ) применяется схема Галеркина. В результате решения СЛАУ определяются распределения токов по всему объекту и могут быть вычислены наведенные напряжения.

Для каждой интересующей величины помехи (тока или напряжения) полученное значение  $K_k$  имеет смысл коэффициента преобразования спектральной составляющей частоты  $f_k$  тока ЭСР в соответствующую спектральную составляющую помехи. Величины  $X_k$ , пропорциональные комплексным амплитудам спектральных составляющих помехи, будут иметь вид

$$X_k = K_k I_k. \quad (3)$$

Определяя  $X_k$  для  $k = N/2 + 1, \dots, N - 1$  по формуле  $X_k = (X_{N-k})^*$  и применяя к  $X_k$  обратное дискретное преобразование Фурье

$$x_n = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} X_k e^{\frac{2\pi j}{N} kn} \quad (4)$$

получаем значения помехи  $x(t)$  в моменты времени  $t$ .

## ЧИСЛЕННЫЙ ПРИМЕР

Для сравнения результатов, полученных с помощью известных методов временной области и предложенного метода, рассмотрим конфигурацию, являющуюся упрощением примера [7], иллюстрирующего возможности пакета математического моделирования для моделирования воздействия ЭСР.

Ток ЭСР задается между проводящей горизонтальной пластиной связи размером  $100 \times 60$  мм и перпендикулярной ей металлической полоской размером  $60 \times 1$  мм,

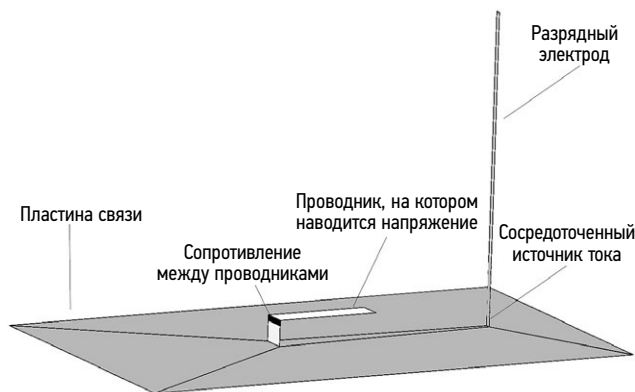


Рис. 1. Геометрия модели.

Fig. 1. Model geometry.

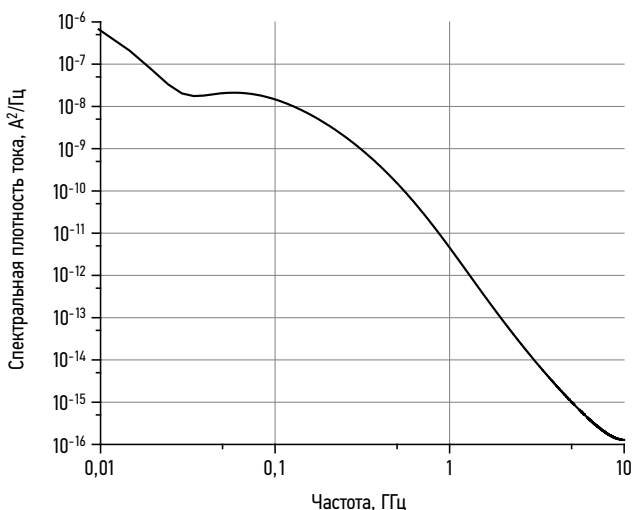


Рис. 2. Спектральная плотность тока электростатического разряда.

Fig. 2. Spectral density of electrostatic discharge current.

моделирующей разрядный электрод испытательного генератора или металлический предмет в руке человека (рис. 1). Точка соприкосновения разрядного электрода и пластины связи находится на расстоянии 15 мм от короткой стороны пластины и на равном расстоянии от двух длинных ее сторон. В центре пластины на расстоянии 5 мм от нее расположен проводник размером  $20 \times 5$  мм. Проводник и пластина соединены вертикальным проводником. Между вертикальным и горизонтальным проводниками задано сопротивление 50 Ом. В качестве величины помехи рассматривается напряжение на этом сопротивлении (которое соответствует потенциалу, наведенному на горизонтальном проводнике относительно пластины связи). Все проводники предполагаются идеально проводящими.

В соответствии с [1] и [2] ток ЭСР при испытательном напряжении 4 кВ задается формулой:

$$i(t) = 48,04 \frac{\left(\frac{t}{1,1}\right)^{1,8}}{1 + \left(\frac{t}{1,1}\right)^{1,8}} e^{\left(\frac{t}{2}\right)} + 21,55 \frac{\left(\frac{t}{12}\right)^{1,8}}{1 + \left(\frac{t}{12}\right)^{1,8}} e^{\left(\frac{t}{37}\right)}, \quad (5)$$

где  $t$  — время, выраженное в наносекундах. На рис. 2 показана спектральная плотность тока (5), полученная с помощью быстрого преобразования Фурье с шагом по времени  $\tau = 0,05$  нс и числом отсчетов  $N = 4096$ .

На рис. 3 показана зависимость коэффициента преобразования К гармонического тока между разрядным электродом и пластиной связи в напряжение на сопротивлении от частоты, рассчитанная в программе «STAR3D High Frequency», разработанной во ФГУП «Крыловский государственный научный центр». Решение получено численным решением ИУЭП для сетки, состоящей из 1690 треугольников. Зависимость имеет резонансный характер, максимум модуля коэффициента преобразования достигается на частотах около 2,2 ГГц, 4,4 ГГц,

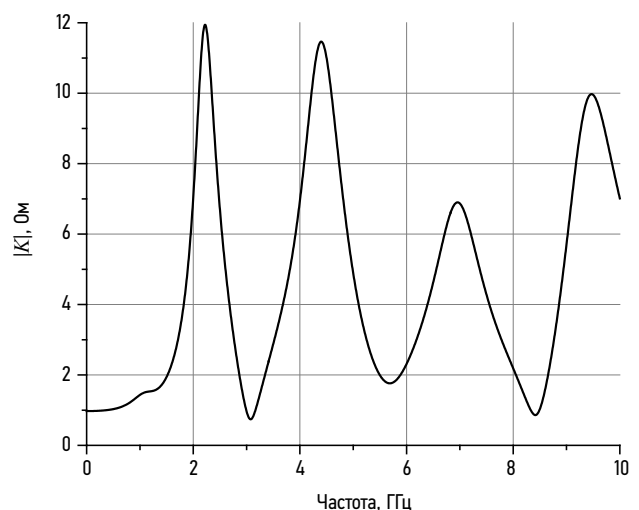
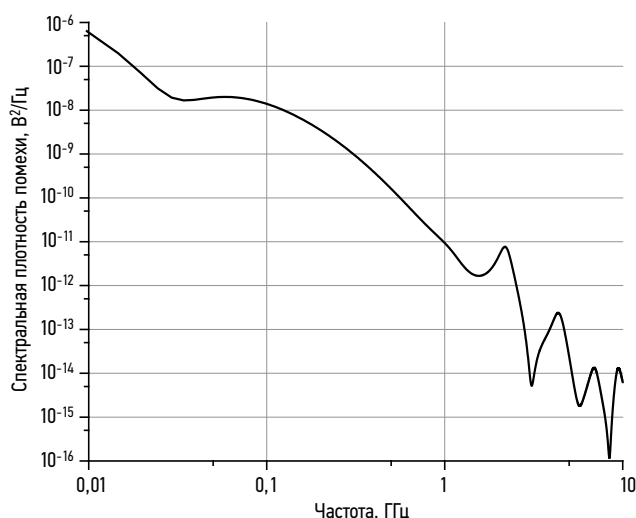
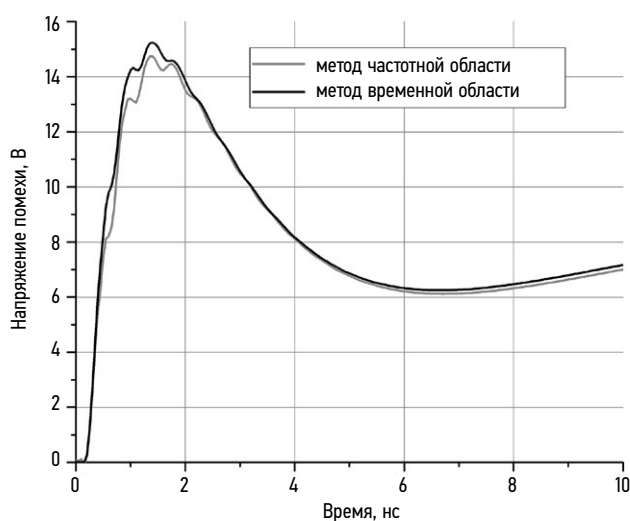


Рис. 3. Зависимость коэффициента преобразования от частоты.

Fig. 3. Relationship between the conversion factor and frequency.



**Рис. 4.** Спектральная плотность помехи от электростатического разряда.  
**Fig. 4.** Spectral density of electrostatic discharge interference.



**Рис. 5.** Временная зависимость напряжения помехи.  
**Fig. 5.** Time dependence of interference voltage.

7,0 ГГц, 9,5 ГГц. Применение формулы (3) позволяет определить спектральный состав помехи (рис. 4). На рис. 5 сравнивается временная зависимость напряжения помехи, полученная по формуле (4) (серая кривая), с результатами, полученными методом конечных элементов во временной области в пакете математического моделирования (черная кривая). Кривые хорошо совпадают, различие максимальных значений напряжения составляет 0,8 В (5%).

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе показана принципиальная возможность использования методов частотной области для моделирования импульсных электромагнитных воздействий, таких как воздействие ЭСР. При этом воздействие каждой частотной составляющей анализируется независимо, что допускает высокую степень параллелизации вычислений, в то время как расчет методами временной области требует завершения расчетов для предшествующих моментов времени. Требования к размеру элементов расчетной сетки определяются длиной волны на максимальной учитываемой частоте. Результаты, полученные с помощью методов частотной области и методов временной области, совпадают с достаточной для практических расчетов точностью.

Анализ спектральных составляющих воздействия и помехи, зависимости коэффициента преобразования воздействия в помеху от частоты дает дополнительную информацию о связи уровней помех с геометрией блоков аппаратуры и о возможных путях их снижения. При дальнейшем совершенствовании методов моделирования воздействия электростатического разряда необходимо учесть зависимость формы разрядного тока от параметров блоков, на которые воздействует разряд.

## ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ИНФОРМАЦИЯ

**Вклад авторов.** Автор статьи одобрил ее рукопись (версию для публикации).

**Источники финансирования.** Автор заявляет 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 использовались.

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

## ADDITIONAL INFORMATION

**Author contributions:** The author approved the version of the manuscript to be published.

**Funding sources:** No funding.

**Disclosure of interests:** The authors have no relationships, activities, or interests for the last three years related to for-profit or not-for-profit third parties whose interests may be affected by the content of the article.

**Statement of originality:** No previously obtained or published material (text, images, or data) was used in this study or article.

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

**Provenance and peer review:** This paper was submitted unsolicited and reviewed following the standard procedure. The peer review process involved one reviewer, a member of the editorial board, and the in-house scientific editor.



## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. ГОСТ 30804.4.2-2013 (IEC 61000-4-2:2008). Совместимость технических средств электромагнитная. Устойчивость к электростатическим разрядам. Требования и методы испытаний. М.: Стандартинформ, 2014.
2. IEC 61000-4-2:2008 Electromagnetic compatibility (EMC) — Part 4-2: Testing and measurement techniques — Electrostatic discharge immunity test. Geneva: IEC, 2008.
3. Hosseinbeig A., Izadi O.H., Solanki S., et al. Methodology for analyzing ESD-induced soft failure using full-wave simulation and measurement // *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*. 2018. Vol. 61, N. 1. P. 11–19. doi: 10.1109/TEMC.2017.2787721
4. Yang L., Yang C., Tu Y., et al. Field-circuit co-simulation method for electrostatic discharge investigation in electronic products // *IEEE Access*. 2021. Vol. 9. P. 33512–33521. doi: 10.1109/ACCESS.2021.3061125 EDN: LWPSTC
5. Teixeira F.L., Sarris C., Zhang Y., et al. Finite-difference time-domain methods // *Nature Reviews Methods Primers*. 2023. Vol. 3, N. 1. doi: 10.1038/s43586-023-00257-4 EDN: JVNGOE
6. Angeli M., Cardelli F. Numerical modeling of electromagnetic fields generated by electrostatic discharges // *IEEE Transactions on Magnetics*. 1997. Vol. 33, N. 2. P. 2199–2202. doi: 10.1109/20.582769
7. Electrostatic Discharge (ESD) Test of a PCB. 2023. [internet] Дата обращения: 11.05.2025. Режим доступа: <https://www.comsol.com/model/electrostatic-discharge-esd-test-of-a-pcb-109291>.
8. Fu H.-Z., Xie Y.-J., Zhang J. Analysis of corona discharge interference on antennas on composite airplanes // *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*. 2008. Vol. 50, N. 4. P. 822–827. doi: 10.1109/TEMC.2008.2004598
9. Rao S., Wilton D., Glisson A. Electromagnetic scattering by surfaces of arbitrary shape // *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*. 1982. Vol. 30, N. 3. P. 409–418. doi: 10.1109/TAP.1982.1142818
10. Гримальский О.В., Лаповок А.Я. Устранение низкочастотной неустойчивости в вычислительных моделях электромагнитного поля оболочек и проводников // *Известия Российской академии наук. Энергетика*. 2006. №. 4. С. 26–39. EDN: HULFBZ
11. Lapovok A., Nizkiy R., Shikhov I., Grimal'ski O. Selection of basis functions for volume-surface integral equation using spanning tree. In: 2014 IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium (APSURSI). IEEE, 2014. P. 2138–2139. doi: 10.1109/APS.2014.6905396 EDN: UFBNXH
12. Liu J., Li Z., Su J., Song J. On the volume-surface integral equation for scattering from arbitrary shaped composite PEC and inhomogeneous bi-isotropic objects // *IEEE Access*. 2019. Vol. 7. P. 85594–85603. doi: 10.1109/ACCESS.2019.2923650

## REFERENCES

1. GOST 30804.4.2-2013 (IEC 61000-4-2:2008). Electromagnetic compatibility of technical equipment. Immunity to electrostatic discharges. Requirements and test methods. Moscow: Standartinform; 2014. (In Russ.)
2. IEC 61000-4-2:2008 Electromagnetic compatibility (EMC). Part 4–2: Testing and measurement techniques — Electrostatic discharge immunity test. Geneva: IEC; 2008.
3. Hosseinbeig A, Izadi OH, Solanki S, et al. Methodology for analyzing ESD-induced soft failure using full-wave simulation and measurement. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*. 2018;61(1):11–19. doi: 10.1109/TEMC.2017.2787721
4. Yang L, Yang C, Tu Y, et al. Field-circuit co-simulation method for electrostatic discharge investigation in electronic products. *IEEE Access*. 2021;9:33512–33521. doi: 10.1109/ACCESS.2021.3061125 EDN: LWPSTC
5. Teixeira FL, Sarris C, Zhang Y, et al. Finite-difference time-domain methods. *Nature Reviews Methods Primers*. 2023;3(1). doi: 10.1038/s43586-023-00257-4 EDN: JVNGOE
6. Angeli M, Cardelli F. Numerical modeling of electromagnetic fields generated by electrostatic discharges. *IEEE Transactions on Magnetics*. 1997;33(2):2199–2202. doi: 10.1109/20.582769
7. Electrostatic Discharge (ESD) Test of a PCB. 2023. [internet] Accessed: 11.05.2025. Available from: <https://www.comsol.com/model/electrostatic-discharge-esd-test-of-a-pcb-109291>
8. Fu H-Z, Xie Y-J, Zhang J. Analysis of corona discharge interference on antennas on composite airplanes. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*. 2008;50(4):822–827. doi: 10.1109/TEMC.2008.2004598
9. Rao S, Wilton D, Glisson A. Electromagnetic scattering by surfaces of arbitrary shape. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*. 1982;30(3):409–418. doi: 10.1109/TAP.1982.1142818
10. Grimal'skiy OV, Lapovok AY. Elimination of low-frequency instability in computational models of the electromagnetic field of shells and conductors. *Izvestiya Rossiyskoy akademii nauk. Energetika*. 2006;4:26–39. (In Russ.) EDN: HULFBZ
11. Lapovok A, Nizkiy R, Shikhov I, Grimal'ski O. Selection of basis functions for volume-surface integral equation using spanning tree. In: 2014 IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium (APSURSI). IEEE; 2014:2138–2139. doi: 10.1109/APS.2014.6905396 EDN: UFBNXH
12. Liu J, Li Z, Su J, Song J. On the volume-surface integral equation for scattering from arbitrary shaped composite PEC and inhomogeneous bi-isotropic objects. *IEEE Access*. 2019;7:85594–85603. doi: 10.1109/ACCESS.2019.2923650

## ОБ АВТОРЕ

**Низкий Роман Яковлевич,**

канд. техн. наук, старший научный сотрудник,  
Крыловский государственный научный центр;  
заведующий базовой кафедрой физических полей  
объектов морской техники и океана, Санкт-Петербургский  
государственный морской технический университет;  
адрес: Россия, 196158, Санкт-Петербург, Московское ш., д. 44;  
eLibrary SPIN: 6115-8881;  
e-mail: nizkyroman@gmail.com

## AUTHOR INFO

**Roman Ya. Nizkiy,**

Cand. Sci. (Engineering), Senior Scientific Employee,  
Krylov State Research Centre;  
Head of the Basic Department of Physical Fields of Marine  
Engineering and Ocean Facilities, Saint Petersburg State Marine  
Technical University;  
address: 44 Moskovskoe hwy, Saint Petersburg, Russia, 196158;  
eLibrary SPIN: 6115-8881;  
e-mail: nizkyroman@gmail.com

Оригинальное исследование

УДК 621.351

DOI: [https://doi.org/10.52899/24141437\\_2025\\_03\\_413](https://doi.org/10.52899/24141437_2025_03_413)

EDN: FURQMH

# Система хранения и подачи водорода в батарею топливных элементов

С.Я. Галушин

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

## АННОТАЦИЯ

**Актуальность.** В настоящей статье рассматриваются актуальные вопросы использования водородной энергетики для морских транспортных средств. К ним можно отнести хранение и подачу водорода в батарею топливных элементов с твердополимерным электролитом. В настоящее время наиболее отработанными системами хранения водорода выступают титановые и композитные баллоны. Конкуренцию им составляют интерметаллидные устройства. Каждое из этих систем хранения имеет свои достоинства и недостатки. Современные баллоны из композита позволяют выдерживать давления газа до 400 атмосфер. Редуцирование водорода с 400 атмосфер до нескольких единиц или десятков бар представляют собой решаемую задачу. При этом нужно учитывать, что изменение давления газа влечет за собой существенное понижение температуры топлива, поступающего в батарею топливных элементов. Холодный сухой водород снижает коэффициент полезного действия электрохимического генератора. Для повышения коэффициента полезного действия необходимо его подогреть и увлажнить.

**Методы.** Применяется метод, при котором используется система рециркуляции водорода, состоящая из струйного аппарата, теплообменного аппарата, системы управления рециркуляцией топлива на базе микропроцессора, датчиков и трубопроводов. Целью использования системы рециркуляции водорода является поддержание водного баланса батареи и рециркуляция неиспользованного в реакции водорода. Для поддержания постоянного давления в напорной магистрали батареи топливных элементов применяется модифицированный электропневматический преобразователь ITV с обратной связью.

**Результаты.** В результате получается система, обеспечивающая поддержание постоянного давления водорода на входе в батарею топливных элементов, и более эффективное использования топлива.

**Выводы.** Использование системы рециркуляции водорода ведет к повышению коэффициента полезного действия установки, а применение модифицированного электропневматического преобразователя ITV позволяет поддерживать постоянное давление топлива перед батареями топливных элементов.

**Ключевые слова:** система хранения газов; водород; батарея топливных элементов; система рециркуляции; струйный аппарат; электропневматический преобразователь.

## Как цитировать

Галушин С.Я. Система хранения и подачи водорода в батарею топливных элементов // Труды Санкт-Петербургского государственного морского технического университета. 2025. Т. 4, № 3. С. 413–420. DOI: 10.52899/24141437\_2025\_03\_413 EDN: FURQMH

Original Study Article

DOI: [https://doi.org/10.52899/24141437\\_2025\\_03\\_413](https://doi.org/10.52899/24141437_2025_03_413)

EDN: FURQMH

# Hydrogen Storage and Supply System for Fuel Cell Stack

Sergey Ya. Galushin

Saint Petersburg State Marine Technical University, Saint Petersburg, Russia

## ABSTRACT

**BACKGROUND:** This paper discusses the relevant issues of using hydrogen energy for marine vehicles, including hydrogen storage and feeding to a solid polymer electrolyte fuel cell stack. Currently, the most proven hydrogen storage systems are titanium and composite cylinders. They compete with intermetallic devices. Each storage system has its own advantages and disadvantages. Contemporary composite cylinders can accommodate gas pressure of up to 400 atmospheres. Reducing hydrogen from 400 atmospheres to several units or tens of bars is a solvable problem. However, it should be considered that changing the gas pressure significantly decreases the fuel temperature at the inlet of the fuel cell stack. Cold dry hydrogen reduces the performance of the electrochemical generator. To increase the performance, it must be heated and humidified.

**METHODS:** The method used is a hydrogen recirculation system consisting of a jet device, a heat exchanger, a microprocessor-based fuel recirculation control system, sensors, and pipelines. The purpose of the hydrogen recirculation system is to maintain the water balance in the battery and recirculate unused hydrogen in the reaction. The modified electropneumatic converter ITV with feedback is used to maintain constant pressure in the pressure line of the fuel cell battery.

**RESULTS:** We build a system that maintains constant hydrogen pressure at the inlet of the fuel cell battery and allows for more efficient use of fuel.

**CONCLUSION:** The hydrogen recirculation system allows to increase in the efficiency of the plant and the modified electropneumatic converter ITV allows maintaining a constant fuel pressure upstream of the fuel cell stack.

**Keywords:** gas storage system; hydrogen; fuel cell battery; recirculation system; jet device; electropneumatic converter.

## To cite this article

Galushin SYa. Hydrogen Storage and Supply System for Fuel Cell Stack. *Transactions of the Saint Petersburg State Marine Technical University*. 2025;4(3):413–420. DOI: [10.52899/24141437\\_2025\\_03\\_413](https://doi.org/10.52899/24141437_2025_03_413) EDN: FURQMH

Submitted: 24.07.2025

Accepted: 04.08.2025

Published online: 22.09.2025

## ВВЕДЕНИЕ

Баллонный блок хранения энергоносителя рассматривается как жёсткая оболочка, энергией деформации которой можно пренебречь по сравнению с изменением энергии энергоносителя в процессах его приема и выдачи и по сравнению с теплотой, аккумулируемой оболочкой при изменении ее температуры. Оболочка находится в тепловом контакте с окружающей средой и находящимся внутри нее энергоносителем. Таким образом, баллоны блока хранения энергоносителя представляет собой открытую термодинамическую систему, обменивающуюся с окружающей средой веществом и энергией (в форме теплоты, передаваемой через оболочку баллонов, и с веществом, принимаемым на хранение или отпускаемым потребителям). В настоящее время наиболее отработанными системами хранения водорода выступают титановые и композитные баллоны. Конкуренцию им составляют инертметаллидные устройства [1–3].

## ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ

Рассматриваемая термодинамическая система характеризуется постоянным объемом  $V$ , занятым энергоносителем. Площадь поверхности, ограничивающей этот объем равна  $F_B$ . Поверхность, отделяющая систему (баллоны) от окружающей среды, имеет площадь  $F_H$ . Масса материала оболочки равна  $M_M$ , его теплоемкость обозначим  $C_M$ , а теплопроводность —  $\lambda_M$ . Текущее значение средней температуры оболочки баллона обозначим  $\bar{\theta}$ .

В произвольный момент времени в системе находится хранимый компонент, масса которого равна  $M$ , а параметры состояния  $T$  и  $p$ . Он обменивается с оболочкой через поверхность  $F_B$  теплотой. Интенсивность этого обмена энергией характеризуется интегральным значением теплового потока  $Q_B$ . Наружная поверхность оболочки, площадь которой равна  $F_H$ , находится в тепловом контакте с окружающей средой. Интенсивность этого обмена энергией характеризуется интегральным значением теплового потока  $Q_H$ . Окружающая среда имеет температуру  $T_{окр}$ .

Кроме того, система обменивается с окружающей средой (через магистраль приема или выдачи энергоносителя) веществом (и переносимой с ним энергией). Интенсивность обмена веществом характеризуется массовым расходом  $G$ . ( $G > 0$ , если система принимает компонент на хранение,  $G < 0$ , если система отпускает вещество потребителям).

Пренебрегая пространственным распределением параметров в системе, основные уравнения математической модели (уравнение закона сохранения массы, уравнения закона сохранения энергии для энергоносителя и оболочки и уравнение состояния энергоносителя) можно представить в приведенном ниже виде.

## Уравнение закона сохранения массы энергоносителя

Масса системы изменяется в результате приёма или отпуска хранимого компонента. В произвольный момент времени  $\tau$  за элементарный промежуток времени  $d\tau$  изменение массы системы  $dM$  составит:

$$dM = G(\tau)d\tau, \quad (1)$$

или:

$$V \frac{d\rho}{d\tau} = G(\tau). \quad (2)$$

Учитывая, что  $\rho = \nu^{-1}$  и, следовательно:

$$\frac{d\rho}{d\tau} = -\nu^{-2} \frac{d\nu}{d\tau} \quad (3)$$

имеем:

$$\frac{V}{\nu^2} \cdot \frac{d\nu}{d\tau} = -G(\tau), \quad (4)$$

где  $\rho$  — плотность энергоносителя в блоке хранения в текущий момент времени, моль·м<sup>-3</sup>;  $\nu$  — удельный объем энергоносителя в блоке хранения в текущий момент времени, м<sup>3</sup>·моль<sup>-1</sup>.

## Уравнение закона сохранения энергии для энергоносителя

Внутренняя энергия энергоносителя  $U$  в рассматриваемой системе изменяется вследствие обмена теплотой с интенсивностью  $Q_B(\tau)$  через поверхность  $F_B$  с оболочкой, а также веществом, переносящим поток энергии  $i(\tau) \cdot G(\tau)$ . Следовательно, за элементарный промежуток времени  $d\tau$  изменение внутренней энергии энергоносителя  $dU$  составит:

$$dU = Q_B(\tau) \cdot d\tau + i(\tau) \cdot G(\tau) \cdot d\tau, \quad (5)$$

где  $i(\tau)$  — удельная энтальпия энергоносителя (покидающего систему или поступающего в нее) в текущий момент времени  $\tau$ , Дж·моль<sup>-1</sup>.

Поскольку  $i = u + p \cdot \nu$ ,  $dU = d(u \cdot M) = u \cdot dM + M \cdot du$ , а  $G(\tau) \cdot d\tau = dM$ , то:

$$u \cdot dM + M \cdot du = Q_B(\tau) \cdot d\tau + (u + p \cdot \nu) \cdot dM, \quad (6)$$

или (после сокращения подобных):

$$Mdu = Q_B(\tau) \cdot d\tau + p \cdot \nu \cdot dM. \quad (7)$$

В общем случае  $du = d(c_v \cdot T) = c_v \cdot dT + T \cdot dc_v$ . Поэтому уравнение закона сохранения энергии для энергоносителя в баллонах блока хранения в газообразном состоянии под давлением в режимах его приема и выдачи можно записать в виде:

$$M \cdot (c_v \cdot dT + T \cdot dc_v) = Q_B(\tau) \cdot d\tau + p \cdot \nu \cdot dM. \quad (8)$$

## Уравнение состояния энергоносителя

При сверхвысоком давлении взаимосвязь параметров состояния реального газа не подчиняются уравнению (1). Она устанавливается исключительно на основании экспериментальных данных, которые в общепризнанной современной научно-технической литературе [4, 5] представлены в табличной форме, что затрудняет их использование в математических моделях, оперирующих аналитическими выражениями. Вместе с тем известно, что в эпоху бурного развития приложений молекулярно-кинетической теории предпринимались многократные попытки уточнить уравнение Клапейрона–Менделеева применительно к реальным газам при параметрах, существенно отличающихся от нормальных. Из предложенных в свое время сотен вариантов уравнения состояния реального газа авторы настоящей работы, сообразуясь с ее целями, приняли для дальнейшего использования уравнение Битти–Бриджмена [6], которое было предложено в 1927 г. В соответствии с первоисточником оно устанавливает взаимосвязь параметров состояния реального газа с высокой степенью точности (для водорода в интервале температур от  $-70\text{ }^{\circ}\text{C}$  до  $+300\text{ }^{\circ}\text{C}$  при давлении до 1000 атм., а для кислорода в интервале температур от  $-117\text{ }^{\circ}\text{C}$  до  $+100\text{ }^{\circ}\text{C}$  при давлении до 103 атм.). В истекшее с момента создания этого уравнения время могли быть уточнены экспериментальные данные, на которые опирались его авторы. В связи с этим в рамках настоящей работы выполнено сопоставление расчетных значений параметров состояния по уравнению Битти–Бриджмена и табличных данным, представленных в современной справочной литературе [4, 5]. Удовлетворительные результаты сопоставления для водорода во всем диапазоне изменения давления (относительная погрешность не превышает 5–6% кроме очень низких температур, менее 160 К) позволяют принять его для выполнения дальнейших исследований в оригинальном виде:

$$p = \frac{RT}{v^2} \cdot \left[ v + B_0 \cdot \left( 1 - \frac{b}{v} \right) \right] \cdot \left( 1 - \frac{C}{v \cdot T^3} \right) - \frac{A_0}{v^2} \cdot \left( 1 - \frac{a}{v} \right). \quad (9)$$

Значения коэффициентов в уравнении (9) следует брать из табл. 1.

Значения критических параметров для водорода составляют:

$$T_{\text{кр.}} = 33,3 \text{ К}; p_{\text{кр.}} = 1,296 \text{ МПа} = 12,8 \text{ атм.}; \\ \rho_{\text{кр.}} = 31 \text{ кг} \cdot \text{м}^{-3}.$$

Критические параметры кислорода:

$$T_{\text{кр.}} = 154,8 \text{ К}; p_{\text{кр.}} = 5,077 \text{ МПа} = 50,1 \text{ атм.}; \\ \rho_{\text{кр.}} = 410 \text{ кг} \cdot \text{м}^{-3}.$$

При использовании уравнения Битти–Бриджмена необходимо иметь в виду, что указанные значения входящих в него коэффициентов подразумевают применение распространенной в период его создания системы единиц:

- $v$  [мл·моль $^{-1}$ ],
- $T$  [К],
- $p$  [атм.],
- $R = 82,06$  [мл·атм·моль $^{-1}$ ·град. $^{-1}$ ].

## Оценка диапазона изменения параметров энергоносителей в баллонных блоках хранения в динамических режимах

Рассмотрим типичные случаи работы систем хранения, отличающиеся параметрами среды и условиями взаимодействия с окружающей средой, с целью предварительной оценки возможного диапазона изменения параметров энергоносителей в динамических режимах. При этом, несколько огрубляя модель на данном этапе исследования, примем дополнительные упрощающие допущения: будем считать, что выдача энергоносителя осуществляется с постоянным массовым расходом  $G$ , аккумуляция теплоты оболочкой отсутствует, а энергоноситель подчиняется законам идеального газа. Тогда из основных уравнений модели получим:

$$(M_0 + G \cdot \tau) \cdot c_v \cdot dT = R \cdot T \cdot G \cdot d\tau + k \cdot F \cdot (T_{\text{окр}} - T) \cdot d\tau, \quad (10)$$

где  $M_0$  — масса энергоносителя в блоке хранения в начальный момент времени, моль;  $F$  — площадь поверхности оболочки блока хранения, м $^2$ ;  $k$  — коэффициент теплопередачи через эту поверхность, Вт·м $^{-2}$ ·К $^{-1}$ .

При постоянных коэффициентах это уравнение имеет следующее решение:

$$T = \frac{k \cdot F \cdot T_{\text{окр}}}{k \cdot F - R \cdot G} + \left( T_0 - \frac{k \cdot F \cdot T_{\text{окр}}}{k \cdot F - R \cdot G} \right) \times \\ \times M_0^{\frac{k \cdot F - R \cdot G}{c_v \cdot G}} \cdot (M_0 + G \cdot \tau)^{\frac{k \cdot F - R \cdot G}{c_v \cdot G}}. \quad (11)$$

Ниже приводятся полученные с использованием этого уравнения оценки возможного диапазона изменения параметров водорода в блоке хранения.

Графики, представленные на рис. 1, показывают зависимость температуры водорода в цилиндрическом баллоне объемом 50 л от времени при массовом расходе из него  $G = -0,153$  г/с, который соответствует мощности

**Таблица 1.** Значения коэффициентов для водорода и кислорода

**Table 1.** Coefficients for hydrogen and oxygen

Реальный газ	$A_0$	$a \cdot 10^3$	$B_0 \cdot 10^3$	$b \cdot 10^3$	$C \cdot 10^{-4}$	Примечание
Водород ( $-70\text{ }^{\circ}\text{C} \leq t \leq 300\text{ }^{\circ}\text{C}$ , $p \leq 1000$ атм.)	0,12404	56,18	20,22	-7,22	2,00	$p < p_{\text{кр.}}$
	0,12404	56,18	17,50	-19,68	2,00	$p > p_{\text{кр.}}$

электрогенерирующей системы электрохимической энергетической установки примерно в 10 кВт.

( $p_0 = 15$  МПа,  $t_0 = 20$  °С,  $V = 50$  л,  $G = -0,153$  г/с)

Начальные значения параметров в баллоне составляют: давление  $p_0 = 15$  МПа, температура  $t_0 = 20$  °С. Масса хранимого водорода в исходном состоянии около 308 моль. Условия теплового взаимодействия с окружающей средой характеризуются ее температурой (в данном случае  $t_{\text{окр}} = 20$  °С) и коэффициентом теплопередачи  $k$ , значения которого принимались равными 0, 2, 5, 10 и 20 Вт/(К·м<sup>2</sup>).

Видно, что весь запас водорода будет израсходован за время, несколько превышающее 1 час. При этом температура водорода будет превышать 0 °С только при достаточно интенсивном тепловом взаимодействии с окружающей средой ( $k = 20$  Вт/(К·м<sup>2</sup>)), что может оказаться труднореализуемым затесненном отсеке для баллона. Если же баллон будет покрыт оболочкой из малотеплопроводного материала, температура в нем может опуститься до неприемлемо низких значений. Пунктирная линия соответствует предельному случаю идеальной тепловой изоляции блока хранения.

В сверхлегких баллонах сверхвысокого давления с силовой оболочкой из углепластика [7] нельзя рассчитывать на интенсивное тепловое взаимодействие с окружающей средой. На рис. 2 представлены зависимости, аналогичные тем, что приведены на рис. 1, только для баллона объемом  $V$  около 62 л, начальное давление в котором составляет 75 МПа при 20 °С. В этом состоянии масса запасенного водорода составляет около 1910 моль. Расход водорода принят  $G = -0,229$  г/с, что соответствует мощности электрогенерирующей системы электрохимической энергетической установки примерно в 15 кВт.

( $p_0 = 75$  МПа,  $t_0 = 20$  °С,  $V = 62$  л,  $G = -0,229$  г/с)

Запас водорода будет израсходован примерно за 4,5 часа. При этом следует ожидать отрицательных значений температуры водорода в блоке хранения, т.к. термическое сопротивление силовой оболочки из углепластика

будет значительным, что воспрепятствует подводу теплоты из окружающей среды.

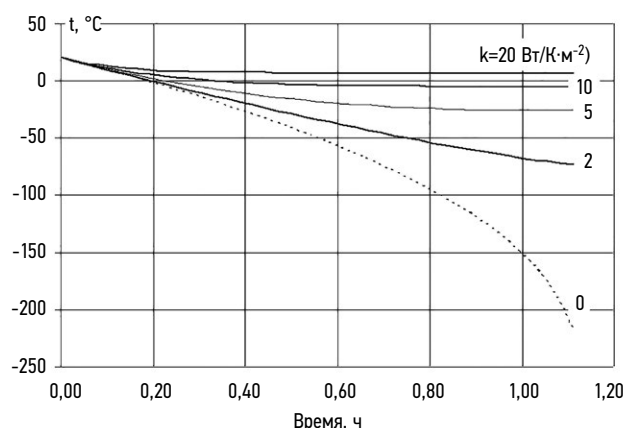
Эти оценки носят предварительный характер. Они лишь показывают необходимость более детального исследования параметров состояния энергоносителя в баллонах блока хранения в газообразном состоянии при сверхвысоком давлении в динамических режимах приема и выдачи энергоносителя.

Таким образом, можно констатировать, что редуцирование водорода из баллона в систему подачи водорода в напорный тракт батареи топливных элементов ведет к существенному понижению температуры газа, что в свою очередь требует системы подогрева редуктора при значительном перепаде давления. Кроме того, необходим подогрев редуцированного водорода.

На рис. 3 представлена система подачи и рециркуляции водорода в батарее топливных элементов (БТЭ).

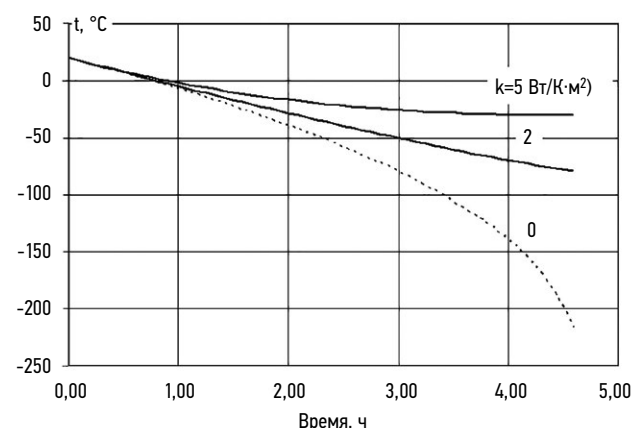
Одной из основных задач системы подачи водорода является поддержание постоянного давления топлива на входе в БТЭ. Расход водорода меняется в зависимости от электрической нагрузки. Разница в давлении водорода и кислорода на протонообменную мембрану не должна превышать 10%. Это связано с тем, что толщина современных мембран не превышает 25 мкм, и превышение разницы в давлениях газов может привести к механическому повреждению мембраны.

На рис. 3 регулятор, предназначенный для поддержания давления водорода перед входом в БТЭ, обозначен как ПЭ-1. Для установления необходимого давления при изменяемом расходе газа он использует обратную связь от датчика давления Рсм на входе в напорный тракт батареи. Холодный водород поступает от системы хранения в теплообменный аппарат Т01-1, где подогревается от теплого неиспользованного в процессе реакции водорода, извлекаемого из камер БТЭ за счет струйного аппарата рециркуляции водорода (САРВ) и поступает в напорную топливную магистраль электрохимического генератора.



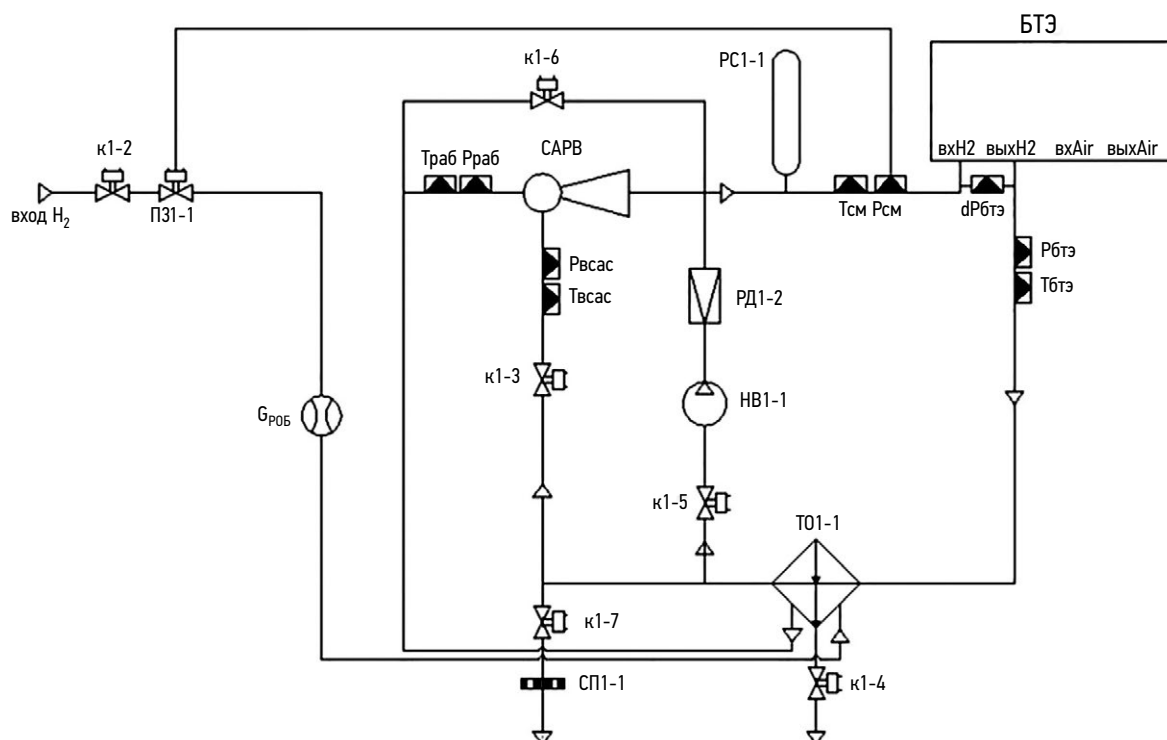
**Рис. 1.** Изменение температуры в баллоне при выдаче водорода в различных условиях теплового взаимодействия с окружающей средой.

**Fig. 1.** Temperature changes in the cylinder when feeding hydrogen under various conditions of thermal interaction with the environment.



**Рис. 2.** Изменение температуры в баллоне при выдаче водорода в различных условиях теплового взаимодействия с окружающей средой.

**Fig. 2.** Temperature changes in the cylinder when feeding hydrogen under various conditions of thermal interaction with the environment.



**Рис. 3.** Принципиальная пневмогидравлическая схема контура рециркуляции водорода батареи с твердополимерным электролитом.  
**Fig. 3.** Basic hydropneumatic diagram of the hydrogen recirculation circuit of a solid polymer electrolyte battery.

Совокупность САРВ, Т01-1, микропроцессорной системы управления циркуляцией газов, датчиков и трубопроводов называется системой рециркуляции водорода (СРВ).

Одним из решений прецизионного поддержания давлений может быть использование электропневматического преобразователя ITV серии 10xx (рис. 4).

Он состоит из работающих в паре впускного и выпускного клапанов 1 и 2 с электромагнитным управлением,

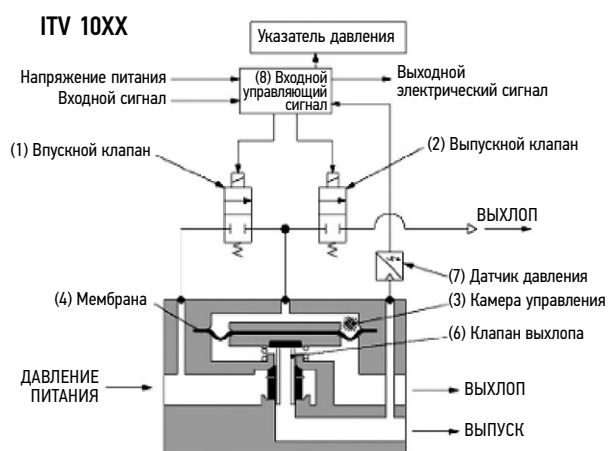
соединенных с камерой управления 3 (рис. 5). В камере управления 3 расположена мембрана 4, которая своим жестким центром через шток соединена с клапаном 5 подачи давления питания и клапаном 6. Выходной канал регулятора по каналу обратной связи соединен с камерой, расположенной под мембраной 4, и с датчиком давления 7, сигнал с которого поступает в блок управления 8. На блок управления 8 поступает напряжение питания, электрический управляющий аналоговый или дискретный сигнал. Блок 8 снабжен дисплеем, показывающим давление на выходе регулятора.

Используемый электропневматический преобразователь функционирует по следующему принципу. При увеличении входного управляющего сигнала, включается впускной клапан 1. В то же время выпускной клапан 2 отключается. При этом давление входящего газа (давление питания) через камеру управления 3 воздействует на мембрану 4, на которую снизу воздействует через канал обратной связи действует давление на выходе электропневматического регулятора.

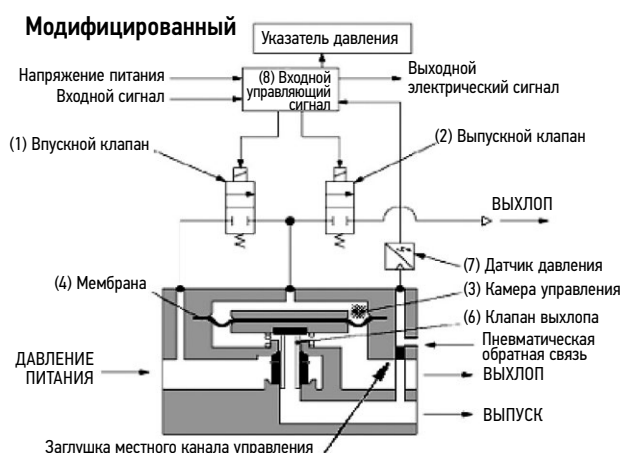
Возрастающее давление управления сверху на мембрану 4 через шток открывает клапан подачи давления 5, что приводит к пропорциональному увеличению давления на выходе электропневматического регулятора. По каналу обратной связи выходное давление поступает в камеру под мембрану 4 и на датчик давления 7. В результате преобразования на датчике 7 сигнал поступает в блок управления 8, в котором происходит сравнение полученного сигнала со входным.



**Рис. 4.** Преобразователь ITV.  
**Fig. 4.** ITV converter.



**Рис. 5.** Исходный регулятор давления ITV серии 10xx.  
**Fig. 5.** Original ITV 10xx pressure control unit.

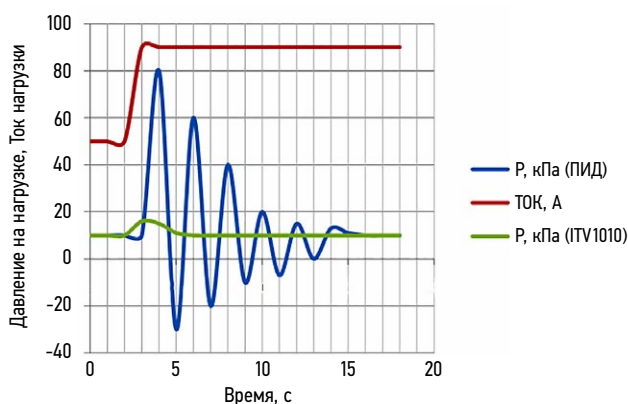


**Рис. 6.** Модификация регулятора давления ITV серии 10xx.  
**Fig. 6.** Modified ITV 10xx pressure control unit.

Движение мембраны 4 вниз, а также возрастание выходного давления будут происходить до момента, когда мембрана 4 придет в равновесное состояние из-за воздействия давлений на неё с двух сторон. При этом сигнал рассогласования в блоке управления 8, получаемый из разницы между входным управляющим сигналом и сигналом обратной связи от датчика 7 не станет равным нулю.

Если входной управляющий электрический сигнал уменьшится, произойдет выключение впускного клапана 1 и одновременное включение выпускного клапана 2. Вследствие чего, через выпускной клапан 2 камера управления 3 соединяется с выхлопом и давление в ней уменьшается. При этом происходит закрытие клапана давления 5 и открытие клапана выхлопа 6 и выходной канал электропневматического регулятора соединяется с выхлопом. Происходит уменьшение давления на выходе регулятора пропорционально уменьшению входного управляющего электрического сигнала.

Модификация регулятора заключается в отключении канала обратной связи от выпускной магистрали посредством установки канальной заглушки местного управления



**Рис. 7.** Характеристики давления регулятора ITV на нагрузку.  
**Fig. 7.** ITV regulator loaded pressure parameters.

и сверлении вспомогательного канала обратной связи от внешней магистрали. Испытания модифицированного регулятора на энергоустановке с электрохимическим генератором показали способность справляться с динамическим изменением расхода, поддерживая постоянство давления на входе потребителя (рис. 6)

Как видно из рис. 7, встроенный ПИД регулятор приводит давление в установленное значение перед входом в батарею топливных элементов с момента изменения нагрузки за 14 с, в то время как модернизированный вариант за счет пневматической обратной связи справляется с этим за 3 с.

## ВЫВОДЫ

В настоящее время баллонная система хранения водорода является наиболее проработанной. Разнообразие материала баллонов — металлические, титановые, композитные — позволяют создать систему хранения топлива для БТЭ, удовлетворяющую различным требованиям по объему, давлению, форме. Регуляторы давления водорода выпускаются промышленно, в том числе и российского производства. В тоже время нет быстродействующих регуляторов давления для поддержания нужных параметров перед батареей топливных элементов. Требуется модернизация промышленно выпускаемых устройств.

Кроме того, для подогрева и увлажнения водорода, получаемого после редуцирования из систем хранения необходимо использовать систему рециркуляции водорода на базе струйного аппарата и теплообменника. Она выводит из реакционных камер неиспользованный теплый увлажненный водород, смешивает его с сухим от системы хранения в САВР и направляет в напорную магистраль ЭХГ. В теплообменных аппаратах, кроме того, производится удаление излишней влаги из газа, извлекаемого из камер БТЭ что ведет к повышению коэффициента полезного действия всей энергетической системы.



## ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ИНФОРМАЦИЯ

**Вклад авторов.** Автор несет ответственность за все аспекты работы, гарантируя надлежащее рассмотрение и решение вопросов, связанных с точностью и добросовестностью любой её части.

**Источники финансирования.** Исследование выполнено за счёт работы по программе развития вузов в России «Приоритет-2030» по проекту № 4, «Морская Робототехника», подпроект 4.5 «Создание электроприводов подводных аппаратов и роботов, а также систем электродвижения морских объектов».

**Конфликт интересов.** Автор декларирует 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 использовались.

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

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Рябчиков К.Е. Хранение водорода // Научный лидер. 2022. № 4(49). Дата обращения: 04.08.2025. Режим доступа: <https://scilead.ru/article/1633-khranenie-vodoroda>.
2. Тарасов Б.П., Бурнашева В.В., Лотоцкий М.В., Яртысь В.А. Методы хранения водорода и возможности использования металлгидридов // Альтернативная энергетика и экология. 2005. 12 (32). С. 14–37. EDN: HRUHYT
3. Фатеев В.Н., Алексеева О.К., Коробцев С.В., и др. Проблемы аккумуляции и хранения водорода // *Kimya Problemleri*. 2018. №4(16). С. 453–483. EDN: VPPIPK doi: 10.32737/2221-8688-2018-4-453-483
4. Joseph T. *Hydrogen Fuel*. Allentown, Washington: Air Products and Chemicals. Inc., 2005. Дата обращения: 04.08.2025. Режим доступа:

## REFERENCES

1. Ryabchikov KE. Hydrogen storage. *Nauchnyy lider*. 2022;4(49). Accessed: 04.08.2025. Available from: <https://scilead.ru/article/1633-khranenie-vodoroda>.
2. Tarasov BP, Burnasheva VV, Lototsky MV, Yartys VA. Methods for storing hydrogen and the possibility of using metal hydrides. *Alternativnaya energetika i ekologiya*. 2005;12(32):14–37. EDN: HRUHYT
3. Fateev VN, Alekseeva OK, Korobtsev SV, et al. Problems of accumulation and storage of hydrogen. *Kimya Problemleri*. 2018;4(16):453–483. EDN: VPPIPK doi: 10.32737/2221-8688-2018-4-453-483
4. Joseph T. *Hydrogen Fuel*. Allentown, Washington: Air Products and Chemicals. Inc.; 2005. Accessed: 04.08.2025. Available from:

## ОБ АВТОРЕ

**Галушин Сергей Яковлевич,**

канд. техн. наук, доцент кафедры судовой автоматики и измерений, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет;  
адрес: Россия, 190121, Санкт-Петербург, ул. Лоцманская, д. 3;  
eLibrary SPIN: 9660-7501;  
e-mail: gs@smtu.ru

## ADDITIONAL INFORMATION

**Author contributions:** The author approved the version of the manuscript to be published and agrees to be accountable for all aspects of the work, ensuring that issues related to the accuracy or integrity of any part of the work are appropriately investigated and resolved.

**Funding sources:** The study was conducted and funded under the Program for the Development Of Universities In Russia Priority 2030, Project No. 4 Marine Robotics, Subproject 4.5 (Development of Electric Drives for Underwater Vehicles and Robots and Electric Propulsion Systems for Offshore Facilities).

**Disclosure of interests:** The authors have no relationships, activities, or interests for the last three years related to for-profit or not-for-profit third parties whose interests may be affected by the content of the article.

**Statement of originality:** No previously obtained or published material (text, images, or data) was used in this study or article.

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

**Provenance and peer review:** This paper was submitted unsolicited and reviewed following the standard procedure. The peer review process involved one reviewer, a member of the editorial board, and the in-house scientific editor.

[https://www1.eere.energy.gov/hydrogenandfuelcells/education/pdfs/joseph\\_infrastructure\\_for\\_emerging\\_markets.pdf](https://www1.eere.energy.gov/hydrogenandfuelcells/education/pdfs/joseph_infrastructure_for_emerging_markets.pdf)

5. Amos W.A. *Costs of Storing and Transporting Hydrogen*. Colorado: National Renewable Energy Laboratory, 1998. № NREL/TP-570-25106. doi: 10.2172/6574

6. Matsuda H, Nagami M. *Study of large hydrogen liquefaction process*. Kanagawa: Nippon Sanso Corp., 1997. Дата обращения: 04.08.2025. Режим доступа: <http://www.ena.or.jp/WE-NET/ronbun/1997/e5/sanso1997.html>

7. Tzimas E, Filiou C, Peteves S.D., Veyret J.-B. *Hydrogen storage: state-of-the-art and future perspective*. Petten, 2003. Дата обращения: 04.08.2025. Режим доступа: <http://www.jrc.cec.eu.int>

[https://www1.eere.energy.gov/hydrogenandfuelcells/education/pdfs/joseph\\_infrastructure\\_for\\_emerging\\_markets.pdf](https://www1.eere.energy.gov/hydrogenandfuelcells/education/pdfs/joseph_infrastructure_for_emerging_markets.pdf)

5. Amos WA. *Costs of Storing and Transporting Hydrogen*. Colorado: National Renewable Energy Laboratory; 1998. № NREL/TP-570-25106. doi: 10.2172/6574

6. Matsuda H, Nagami M. *Study of large hydrogen liquefaction process*. Kanagawa: Nippon Sanso Corp.; 1997. Accessed: 04.08.2025. Available from: <http://www.ena.or.jp/WE-NET/ronbun/1997/e5/sanso1997.html>

7. Tzimas E, Filiou C, Peteves SD, Veyret J.-B. *Hydrogen storage: state-of-the-art and future perspective*. Petten; 2003. Accessed: 04.08.2025. Available from: <http://www.jrc.cec.eu.int>

## AUTHOR INFO

**Sergey Ya. Galushin,**

Cand. Sci. (Engineering), Associate Professor of the Department of Marine Automation and Measurements, Saint Petersburg State Marine Technical University;  
address: 3 Lotsmanskaya st, 190121, Saint Petersburg, Russia;  
eLibrary SPIN: 9660-7501;  
e-mail: gs@smtu.ru