

ТОМ 26, №2, 2026

eISSN 2687-1653

РЕЦЕНЗИРУЕМЫЙ НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

Advanced Engineering Research (Rostov-on-Don)

Механика / Mechanics

Машиностроение
и машиноведение /
Machine Building
and Machine Science

Информатика,
вычислительная
техника и управление /
Information Technology,
Computer Science
and Management



www.vestnik-donstu.ru
DOI 10.23947/2687-1653



Advanced Engineering Research (Rostov-on-Don)

Рецензируемый научно-практический журнал

eISSN 2687–1653

Издается с 2000 года

Периодичность – 4 выпуска в год

DOI: 10.23947/2687–1653

Учредитель и издатель — Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Донской государственный технический университет» (ДГТУ), г. Ростов-на-Дону

Создан в целях информирования читательской аудитории о новейших достижениях и перспективах в области механики, машиностроения, информатики и вычислительной техники. Издание является форумом для сотрудничества российских и иностранных ученых, способствует сближению российского и мирового научно-информационного пространства.

Журнал включен в перечень рецензируемых научных изданий (К2), в котором должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук (Перечень ВАК) по следующим научным специальностям:

- 1.1.7 – Теоретическая механика, динамика машин (технические науки)
- 1.1.8 – Механика деформируемого твердого тела (технические, физико-математические науки)
- 1.1.9 – Механика жидкости, газа и плазмы (технические науки)
- 1.2.2 – Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ (технические науки)
- 2.3.1 – Системный анализ, управление и обработка информации, статистика (технические науки)
- 2.3.3 – Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами (технические науки)
- 2.3.5 – Математическое и программное обеспечение вычислительных систем, комплексов и компьютерных сетей (технические науки)
- 2.3.7 – Компьютерное моделирование и автоматизация проектирования (технические, физико-математические науки)
- 2.3.8 – Информатика и информационные процессы (технические науки)
- 2.5.2 – Машиноведение (технические науки)
- 2.5.3 – Трение и износ в машинах (технические науки)
- 2.5.5 – Технология и оборудование механической и физико-технической обработки (технические науки)
- 2.5.6 – Технология машиностроения (технические науки)
- 2.5.8 – Сварка, родственные процессы и технологии (технические науки)
- 2.5.9 – Методы и приборы контроля и диагностики материалов, изделий, веществ и природной среды (технические науки)
- 2.5.10 – Гидравлические машины, вакуумная, компрессорная техника, гидро- и пневмосистемы (технические науки)

<i>Регистрация</i>	Выписка из реестра зарегистрированных средств массовой информации ЭЛ № ФС 77 – 78854 от 07 августа 2020 г., выдано Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций
<i>Индексация и архивация</i>	Scopus, RSCI, ПИНЦ (ядро), CyberLeninka, CrossRef, Dimensions, DOAJ, EBSCO, Index Copernicus, Internet Archive, Google Scholar
<i>Сайт</i>	https://vestnik-donstu.ru
<i>Адрес редакции</i>	344003, Российская Федерация, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1
<i>E-mail</i>	vestnik@donstu.ru
<i>Телефон</i>	+7 (863) 2–738–372
<i>Дата выхода №2, 2026 в свет</i>	30.06.2026





Advanced Engineering Research (Rostov-on-Don)

Peer-reviewed scientific and practical journal

eISSN 2687–1653

Published since 2000

Periodicity – 4 issues per year

DOI: 10.23947/2687–1653

Founder and Publisher — Don State Technical University (DSTU), Rostov-on-Don, Russian Federation

The journal is aimed at informing the readership about the latest achievements and prospects in the field of mechanics, mechanical engineering, computer science and computer technology. The publication is a forum for cooperation between Russian and foreign scientists, it contributes to the convergence of the Russian and world scientific and information space.

The journal is included in the List of the leading peer-reviewed scientific publications (Higher Attestation Commission under the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation), where basic scientific results of dissertations for the degrees of Doctor and Candidate of Science in scientific specialties and their respective branches of science should be published.

The journal publishes articles in the following fields of science:

- Theoretical Mechanics, Dynamics of Machines (Engineering Sciences)
- Deformable Solid Mechanics (Engineering, Physical and Mathematical Sciences)
- Mechanics of Liquid, Gas and Plasma (Engineering Sciences)
- Mathematical Simulation, Numerical Methods and Program Systems (Engineering Sciences)
- System Analysis, Information Management and Processing, Statistics (Engineering Sciences)
- Automation and Control of Technological Processes and Productions (Engineering Sciences)
- Software and Mathematical Support of Machines, Complexes and Computer Networks (Engineering Sciences)
- Computer Modeling and Design Automation (Engineering, Physical and Mathematical Sciences)
- Computer Science and Information Processes (Engineering Sciences)
- Machine Science (Engineering Sciences)
- Machine Friction and Wear (Engineering Sciences)
- Technology and Equipment of Mechanical and Physicotechnical Processing (Engineering Sciences)
- Engineering Technology (Engineering Sciences)
- Welding, Allied Processes and Technologies (Engineering Sciences)
- Methods and Devices for Monitoring and Diagnostics of Materials, Products, Substances and the Natural Environment (Engineering Sciences)
- Hydraulic Machines, Vacuum, Compressor Equipment, Hydraulic and Pneumatic Systems (Engineering Sciences)

<i>Registration</i>	Extract from the Register of Registered Mass Media ЭЛ № ФС 77 – 78854 dated August 07, 2020, issued by the Federal Service for Supervision of Communications, Information Technology and Mass Media
<i>Indexing and Archiving</i>	Scopus, RSCI, RISC (core), CyberLeninka, CrossRef, Dimensions, DOAJ, EBSCO, Index Copernicus, Internet Archive, Google Scholar
<i>Website</i>	https://vestnik-donstu.ru
<i>Address of the Editorial Office</i>	1, Gagarin sq., Rostov-on-Don, 344003, Russian Federation
<i>E-mail</i>	vestnik@donstu.ru
<i>Telephone</i>	+7 (863) 2–738–372
<i>Date of Publication No.2,2026</i>	30.03.2026



Редакционная коллегия

Главный редактор

Бескопыйный Алексей Николаевич, доктор технических наук, профессор, Донской государственный технический университет (Ростов-на-Дону, Российская Федерация)

Заместитель главного редактора

Сухинов Александр Иванович, член-корреспондент РАН, доктор физико-математических наук, профессор, Донской государственный технический университет (Ростов-на-Дону, Российская Федерация)

Ответственный редактор

Комахидзе Манана Гивиевна, кандидат химических наук, Донской государственный технический университет (Ростов-на-Дону, Российская Федерация)

Ответственный секретарь

Шевченко Надежда Анатольевна, Донской государственный технический университет (Ростов-на-Дону, Российская Федерация)

Айзикович Сергей Михайлович, доктор физико-математических наук, профессор, Донской государственный технический университет (Ростов-на-Дону, Российская Федерация)

Антибас Имад Ризакалла, кандидат технических наук, Донской государственный технический университет (Ростов-на-Дону, Российская Федерация)

Ахилан Аппатурай, младший научный сотрудник, Инженерно-технологический колледж PSN, Университет Анны Ченнаи (Индия)

Ахвердиев Камил Самед Оглы, доктор технических наук, профессор, Ростовский государственный университет путей сообщения (Ростов-на-Дону, Российская Федерация)

Варавка Валерий Николаевич, доктор технических наук, профессор, Донской государственный технический университет (Ростов-на-Дону, Российская Федерация)

Вернер Игорь Михайлович, доктор технических наук, профессор, Технологический институт в Израиле (Израиль)

Воронов Сергей Александрович, доктор технических наук, доцент, Российский фонд фундаментальных исследований (Москва, Российская Федерация)

Галушкин Николай Ефимович, доктор технических наук, профессор, Институт сферы обслуживания и предпринимательства, филиал ДГТУ (Шахты, Российская Федерация)

Лару Гиллесси, доктор технических наук, профессор, Президент Общества машиностроителей (США)

Аныш Губерт, доктор наук, доцент, Варшавский технологический университет (Польша)

Басмачи Гюльтекин, доктор наук, профессор, Университет Бурдура Мехмета Акифа Эрсоя (Турция)

Дворников Олег Владимирович, доктор технических наук, профессор, Белорусский государственный университет (Беларусь)

Демехин Евгений Афанасьевич, доктор физико-математических наук, профессор, Краснодарский филиал Финансового университета при Правительстве РФ (Краснодар, Российская Федерация)

Хамид Абдулла Джалаб, доктор наук (информатика и ИТ), университет Малайя (Малайзия)

Егназарян Карен Оникович, доктор технических наук, профессор, Технологический университет Тампере (Финляндия)

Еремеев Виктор Анатольевич, доктор физико-математических наук, профессор, Южный научный центр РАН (Ростов-на-Дону, Российская Федерация)

Заковоротный Вилор Лаврентьевич, доктор технических наук, профессор, Донской государственный технический университет (Ростов-на-Дону, Российская Федерация)

Кавтарадзе Реваз Зурабович, доктор технических наук, профессор, Институт механики машин им. Р. Двали (Грузия)

Козубал Януш Виталис, доктор технических наук, профессор, Вроцлавский технический университет (Польша)

Хосе Карлос Куадрадо, доктор наук (электротехника и компьютеры), Политехнический институт Порту (Португалия)

Кудиш Илья Исидорович, доктор физико-математических наук, Университет Кеттеринга (США)

Кузнецов Гений Владимирович, доктор физико-математических наук, профессор, Томский политехнический университет (Томск, Российская Федерация)

Курейник Виктор Михайлович, доктор технических наук, профессор, Южный федеральный университет (Ростов-на-Дону, Российская Федерация)

Лысак Владимир Ильич, доктор технических наук, профессор, Волгоградский государственный технический университет (Волгоград, Российская Федерация)

Марчук Владимир Иванович, доктор технических наук, профессор, Институт сферы обслуживания и предпринимательства, филиал ДГТУ (Шахты, Российская Федерация)

Владимир Младенович, доктор технических наук, профессор, Крагуевацкий университет (Сербия)

Мукутадзе Мурман Александрович, доктор технических наук, доцент, Ростовский государственный университет путей сообщения (Ростов-на-Дону, Российская Федерация)

Наседкин Андрей Викторович, доктор физико-математических наук, профессор, Южный федеральный университет (Ростов-на-Дону, Российская Федерация)

Натришвили Тамаз Мамиевич, академик, Институт механики машин им. Р. Двали (Грузия)

Нгуен Донг Ань, доктор физико-математических наук, профессор, Институт механики Академии наук и технологий Вьетнама (Вьетнам)

Нгуен Суан Тьем, доктор технических наук, Вьетнамский государственный технический университет им. Ле Куи Дона (Вьетнам)

Паршин Сергей Георгиевич, доктор технических наук, доцент, Санкт-Петербургский политехнический университет (Санкт-Петербург, Российская Федерация)

Подмастерьев Константин Валентинович, доктор технических наук, профессор, Орловский государственный университет им. И.С. Тургенева (Орел, Российская Федерация)

Поляков Роман Николаевич, доктор технических наук, доцент, Орловский государственный университет им. И.С. Тургенева (Орел, Российская Федерация)

Попов Валентин Леонидович, доктор физико-математических наук, профессор, Институт механики Берлинского технического университета (Германия)

Прокопенко Николай Николаевич, доктор технических наук, профессор, Донской государственный технический университет (Ростов-на-Дону, Российская Федерация)

Рыбак Александр Тимофеевич, доктор технических наук, профессор, Донской государственный технический университет (Ростов-на-Дону, Российская Федерация)

Музафер Сарачевич, доктор наук, профессор, Университет Нови-Пазара (Сербия)

Саруханиян Арестак Арамаисович, доктор технических наук, профессор, Национальный университет архитектуры и строительства Армении (Армения)

Сидоров Владимир Николаевич, доктор технических наук, Российский университет транспорта (Москва, Российская Федерация)

Соловьёв Аркадий Николаевич, доктор физико-математических наук, профессор, Крымский инженерно-педагогический университет имени Февзи Якубова (Симферополь, Республика Крым)

Сумбатьян Межлум Альбертович, доктор физико-математических наук, профессор, Южный федеральный университет (Ростов-на-Дону, Российская Федерация)

Тамаркин Михаил Аркадьевич, доктор технических наук, профессор, Донской государственный технический университет (Ростов-на-Дону, Российская Федерация)

Мурат Тезер, профессор, Ближневосточный университет (Турция)

Бертрам Торстен, доктор технических наук, профессор, Технический университет Дортмунда (Германия)

Турдалиев Умид Мухтаралиевич, доктор технических наук, профессор, Андижанский машиностроительный институт (Узбекистан)

Ахмет Уюмаз, доктор технических наук, профессор, университет Бурдура Мехмета Акифа Эрсоя (Турция)

Али Маджид Хасан Алваэли, доктор наук (компьютерная инженерия), доцент, Университет Аль-Нахрейн (Ирак)

Цибулин Вячеслав Георгиевич, доктор физико-математических наук, доцент, Южный федеральный университет (Ростов-на-Дону, Российская Федерация)

Чернышев Юрий Олегович, доктор технических наук, профессор, Донской государственный технический университет (Ростов-на-Дону, Российская Федерация)

Хучан Ляо, профессор, научный сотрудник ИААМ Старший член Школы бизнеса IEET, Университет Сычуань (Китай)

Языев Батыр Меретович, доктор технических наук, профессор, Донской государственный технический университет (Ростов-на-Дону, Российская Федерация)

Editorial Board

Editor-in-Chief

Alexey N. Beskopylny, Dr.Sci. (Eng.), Professor, Don State Technical University (Rostov-on-Don, Russian Federation)

Deputy Chief Editor

Alexandr I. Sukhinov, Corresponding Member, Russian Academy of Sciences, Dr.Sci. (Phys.-Math.), Professor, Don State Technical University (Rostov-on-Don, Russian Federation)

Executive Editor

Manana G. Komakhidze, Cand.Sci. (Chemistry), Don State Technical University (Rostov-on-Don, Russian Federation)

Executive Secretary

Nadezhda A. Shevchenko, Don State Technical University (Rostov-on-Don, Russian Federation)

Ahilan Appathurai, National Junior Research Fellow, Anna University Chennai (India)

Ahmet Uyumaz, PhD (Eng.), Professor, Burdur Mehmet Akif Ersoy University (Turkey)

Alexander T. Rybak, Dr.Sci. (Eng.), Professor, Don State Technical University (Rostov-on-Don, Russian Federation)

Ali M. Hasan, PhD (Computer Engineering), Al Nahrain University (Baghdad, Iraq)

Andrey V. Nasedkin, Dr.Sci. (Phys.-Math.), Professor, Southern Federal University (Rostov-on-Don, Russian Federation)

Arestak A. Sarukhanyan, Dr.Sci. (Eng.), Professor, National University of Architecture and Construction of Armenia (Armenia)

Arkady N. Solovyev, Dr.Sci. (Phys.-Math.), Professor, Crimean Engineering and Pedagogical University the name of Fevzi Yakubov (Simferopol, Republic of Crimea)

Batyr M. Yazhev, Dr.Sci. (Eng.), Professor, Don State Technical University (Rostov-on-Don, Russian Federation)

Bertram Torsten, Dr.Sci. (Eng.), Professor, TU Dortmund University (Germany)

Evgenii A. Demekhin, Dr.Sci. (Phys.-Math.), Professor, Financial University under the RF Government, Krasnodar branch (Krasnodar, Russian Federation)

Geny V. Kuznetsov, Dr.Sci. (Phys.-Math.), Professor, Tomsk Polytechnic University (Tomsk, Russian Federation)

Gultekin Basmaci, PhD (Eng.), Professor, Burdur Mehmet Akif Ersoy University (Turkey)

Hamid A. Jalab, PhD (Computer Science & IT), University of Malaya (Malaysia)

Hubert Anysz, PhD (Eng.), Assistant Professor, Warsaw University of Technology (Republic of Poland)

Huchang Liao, Professor, IAAM Fellow, IEEE Business School Senior Fellow, Sichuan University (China)

Igor M. Verner, PhD (Eng.), Professor, Technion — Israel Institute of Technology (Israel)

Ilya I. Kudish, PhD (Phys.-Math.), Kettering University (USA)

Imad R. Antipas, Cand.Sci. (Eng.), Don State Technical University (Rostov-on-Don, Russian Federation)

Janusz Witalis Kozubal, Dr.Sci. (Eng.), Wrocław Polytechnic University (Republic of Poland)

José Carlos Quadrado, PhD (Electrical Engineering and Computers), DSc Habil, Polytechnic Institute of Porto (Portugal)

Kamil S. Akhverdiev, Dr.Sci. (Eng.), Professor, Rostov State Transport University (Rostov-on-Don, Russian Federation)

Karen O. Egiazaryan, Dr.Sci. (Eng.), Professor, Tampere University of Technology (Finland)

Konstantin V. Podmaster'ev, Dr.Sci. (Eng.), Professor, Orel State University named after I.S. Turgenev (Orel, Russian Federation)

LaRoux K. Gillespie, Dr.Sci. (Eng.), Professor, President-Elect of the Society of Manufacturing Engineers (USA)

Mezhlum A. Sumbatyan, Dr.Sci. (Phys.-Math.), Professor, Southern Federal University (Rostov-on-Don, Russian Federation)

Mikhail A. Tamarkin, Dr.Sci. (Eng.), Professor, Don State Technical University (Rostov-on-Don, Russian Federation)

Murat Tezer, Professor, Near East University (Turkey)

Murman A. Mukutadze, Dr.Sci. (Eng.), Professor, Rostov State Transport University (Rostov-on-Don, Russian Federation)

Muzafer H. Saračević, Full Professor, Novi Pazar International University (Serbia)

Nguyen Dong Ahn, Dr.Sci. (Phys.-Math.), Professor, Academy of Sciences and Technologies of Vietnam (Vietnam)

Nguyen Xuan Chiem, Dr.Sci. (Eng.), Le Quy Don Technical University (Vietnam)

Nikolay E. Galushkin, Dr.Sci. (Eng.), Professor, Institute of Service and Business, DSTU branch (Shakhty, Russian Federation)

Nikolay N. Prokopenko, Dr.Sci. (Eng.), Professor, Don State Technical University (Rostov-on-Don, Russian Federation)

Oleg V. Dvornikov, Dr.Sci. (Eng.), Professor, Belarusian State University (Belarus)

Revaz Z. Kavtaradze, Dr.Sci. (Eng.), Professor, Raphiel Dvali Institute of Machine Mechanics (Georgia)

Roman N. Polyakov, Dr.Sci. (Eng.), Associate Professor, Orel State University named after I.S. Turgenev (Orel, Russian Federation)

Sergei A. Voronov, Dr.Sci. (Eng.), Associate Professor, Russian Foundation of Fundamental Research (Moscow, Russian Federation)

Sergey G. Parshin, Dr.Sci. (Eng.), Associate Professor, St. Petersburg Polytechnic University (St. Petersburg, Russian Federation)

Sergey M. Aizikovich, Dr.Sci. (Phys.-Math.), Professor, Don State Technical University (Rostov-on-Don, Russian Federation)

Tamaz M. Natriashvili, Academician, Raphiel Dvali Institute of Machine Mechanics (Georgia)

Umid M. Turdaliev, Dr.Sci. (Eng.), Professor, Andijan Machine-Building Institute (Uzbekistan)

Valentin L. Popov, Dr.Sci. (Phys.-Math.), Professor, Berlin University of Technology (Germany)

Valery N. Varavka, Dr.Sci. (Eng.), Professor, Don State Technical University (Rostov-on-Don, Russian Federation)

Victor A. Ereemeev, Dr.Sci. (Phys.-Math.), Professor, Southern Scientific Center of RAS (Rostov-on-Don, Russian Federation)

Victor M. Kureychik, Dr.Sci. (Eng.), Professor, Southern Federal University (Rostov-on-Don, Russian Federation)

Vilor L. Zakovorotny, Dr.Sci. (Eng.), Professor, Don State Technical University (Rostov-on-Don, Russian Federation)

Vladimir I. Lysak, Dr.Sci. (Eng.), Professor, Volgograd State Technical University (Volgograd, Russian Federation)

Vladimir I. Marchuk, Dr.Sci. (Eng.), Professor, Institute of Service and Business, DSTU branch (Shakhty, Russian Federation)

Vladimir M. Mladenovic, Dr.Sci. (Eng.), Professor, University of Kragujevac (Serbia)

Vladimir N. Sidorov, Dr.Sci. (Eng.), Russian University of Transport (Moscow, Russian Federation)

Vyacheslav G. Tsybulin, Dr.Sci. (Phys.-Math.), Associate Professor, Southern Federal University (Rostov-on-Don, Russian Federation)

Yuri O. Chernyshev, Dr.Sci. (Eng.), Professor, Don State Technical University (Rostov-on-Don, Russian Federation)

Содержание

МЕХАНИКА

Электрический разряд между струйным электролитическим катодом и металлическим анодом
С.Ю. Петряков, Э.Р. Белгибаев, А.Ф. Гайсин, Р.Р. Каюмов

Модель машинного обучения для определения предельно допустимого тепловыделения бетона к 28-м суткам в массивных монолитных фундаментных плитах

Т.Н. Кондратьева, В.С. Тюрина, А.С. Чепурненко

Электрополевое формирование биомиметического органоинерального покрытия на природной эмали человеческого зуба: морфология и поверхностные механические свойства

П.В. Середин, Д.Л. Голощапов, Т.А. Литвинова, О.В. Дехнич, Ю.А. Ипполитов

ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

Эффективность и перспективы экспериментального протокола Quick User Datagram Protocol Internet Connections

Д. Рахмани, С.П. Сухарев

Способ оценки состояния кожухотрубчатых теплообменников с применением машинного обучения для повышения энергоэффективности

Л.Г. Тугашова, А.В. Затонский

Аппаратная реализация нечеткой логики на базе элементов тепловой памяти для отказоустойчивого управления в машиностроении

О.В. Володина, А.А. Скворцов, М.Р. Рыбакова, М.В. Корячко

Аналитическая модель буферной памяти OpenFlow коммутатора программно управляемой сети SDN

Г.В. Слюсарев, В.П. Мочалов, Д.В. Гостева

МАШИНОСТРОЕНИЕ И МАШИНОВЕДЕНИЕ

Устранение короблений при упрочняющей термической обработке мелких стержневых изделий

В.Н. Пустовойт, Ю.В. Долгачев

Экспериментальный анализ и подход на основе кривизны для оптимизации точности при 3-осевом фрезеровании с ЧПУ вогнутых параболических поверхностей произвольной формы

Нгок Туен Буй, Нгуен Тхо Ван

Количественная оценка кривизны формы проплавления в зависимости от взаиморасположения электродов при наплавке расщепленной дугой в среде защитного газа

Я.П. Скобликов, С.Б. Сапожков

Contents

MECHANICS

Electric Discharge between a Jet Electrolytic Cathode and a Metal Anode

Sergey Yu. Petryakov, Eduard R. Belgibaev, Almaz F. Gaisin, Rushan R. Kayumov

Machine Learning Model for Determining the 28-day Limit of Concrete Heat Release in Massive Monolithic Foundation Slabs

Tatiana N. Kondratieva, Vasilina S. Tyurina, Anton S. Chepurnenko

Electric-Field-Assisted Formation of a Biomimetic Organomineral Coating on Natural Human Tooth Enamel: Morphology and Surface Mechanical Properties

Pavel V. Seredin, Dmitry L. Goloshchapov, Tatyana A. Litvinova, Olga V. Dekhnich, Yury A. Ippolitov

INFORMATION TECHNOLOGY, COMPUTER SCIENCE AND MANAGEMENT

Efficiency and Prospects of the Experimental QUIC Protocol

Jahed Rahmani, Serafim P. Sukharev

Machine Learning-Based Condition Assessment Method for Shell-and-Tube Heat Exchangers to Improve Energy Efficiency

Larisa G. Tugashova, Andrey V. Zatonskiy

Hardware Implementation of Fuzzy Logic Based on Thermal Memory Elements for Fault-Tolerant Control in Mechanical Engineering

Olga V. Volodina, Arkadiy A. Skvortsov, Margarita R. Rybakova, Marina V. Koryachko

Analytical Model of the Buffer Memory of an OpenFlow Switch in a Software-Defined Network (SDN)

Gennady V. Slyusarev, Valery P. Mochalov, Dar'ya V. Gosteva

MACHINE BUILDING AND MACHINE SCIENCE

Elimination of Distortion during Strengthening Heat Treatment of Small Rod Products

Viktor N. Pustovoit, Yuri V. Dolgachev

Experimental and Curvature-Based Analysis for Accuracy Optimization in 3-Axis CNC Milling of Concave Parabolic Freeform Surfaces

Ngoc Tuyen Bui, Nguyen Tho Van

Quantitative Evaluation of Fusion Zone Curvature Correlation with Electrode Positioning in Shielded Gas Split-Arc Surfacing

Iakov P. Skoblikov, Sergey B. Sapozhkov

МЕХАНИКА MECHANICS



УДК 537.528

Оригинальное эмпирическое исследование

<https://doi.org/10.23947/2687-1653-2026-26-2-2245>

Электрический разряд между струйным электролитическим катодом и металлическим анодом

С.Ю. Петряков, Э.Р. Бельгибаев, А.Ф. Гайсин , Р.Р. Каюмов 

Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева – КАИ, г. Казань, Российская Федерация

✉ almaz87@mail.ru

EDN: MNOFIY

Аннотация

Введение. Газовые разряды с жидкими электродами рассматриваются как перспективный инструмент для улучшения адгезионных свойств и подготовки поверхностей под нанесение покрытий. В литературе подробно изучены тлеющие и дуговые разряды с электролитическими электродами, однако большинство работ сосредоточено на конфигурациях с неподвижным электролитом. Для систем «струйный электролитический катод — металлический анод» при атмосферном давлении формы горения разряда, границы их устойчивости и энергетические характеристики процесса систематизированы недостаточно. Это препятствует масштабированию технологий локальной обработки алюминия. Цель настоящей работы — экспериментально классифицировать формы горения и области их устойчивости, определить электрические, спектральные и тепловые параметры разряда, а также обосновать практические режимы локальной подготовки алюминиевой поверхности под адгезию и покрытия.

Материалы и методы. Для реализации поставленной цели была создана лабораторная установка: струя 3 %-го NaCl выполняла роль катода, алюминиевая пластина АМЦ-40 — анода; узел «струя-анод» размещён в термостатируемой электролитической ячейке с замкнутой циркуляцией раствора. Типичные условия: $U \approx 600$ В, $v_k \approx 0,6–0,7$ м/с, $d \approx 2$ мм, $\sigma \approx 0,10–0,12 \Omega^{-1} \cdot \text{см}^{-1}$; источник питания до 4 кВ/10 А обеспечивал широкий диапазон настроек. Диагностика включала осциллографические измерения, высокоскоростную видеосъёмку (Casio EX-F1, 600–1200 к/с), тепловизионную съёмку (FLIR A6500sc) и ОЭС на спектрометре PLASUS EC 150201 MC с оценкой n_e по штарковскому уширению H_α .

Результаты исследования. Обнаружены две топологии локализации плазмы: контактная зона на тройной линии «газ-жидкость-твёрдое тело» и область распада струи. Ток носит импульсный характер с амплитудой 0,8–1,6 А. В спектрах доминируют дублет Na I (~589 нм), полосы OH(A–X) и линия H_α ; по $\Delta\lambda_L(H_\alpha) \approx 0,64$ нм получена оценка $n_e \approx 6,4 \times 10^{16} \text{ см}^{-3}$. Термовизионные карты показали максимум эффективной температуры ~47 °С в точке контакта и вытянутую вдоль струи зону энерговклада длиной ~7 мм (поперечник ~2 мм).

Обсуждение. Импульсный характер тока с амплитудой 0,8–1,6 А при 600 В свидетельствует о периодическом формировании и срыве токового канала, что типично для разрядов с нестационарной геометрией катодной области и ранее отмечалось в работах по разрядам со стекающими струями. Оценка электронной концентрации $n_e \approx 6,4 \times 10^{16} \text{ см}^{-3}$ по штарковскому уширению H_α попадает в диапазон $10^{15}–10^{17} \text{ см}^{-3}$, характерный для атмосферных разрядов с жидкими электродами, и указывает на относительно плотную плазму, достаточную для эффективной активации поверхности. Доминирование линий Na I в спектре подтверждает интенсивный перенос компонентов электролита в разрядный промежуток, что согласуется с механизмом аэрозольного распыления в прикатодной области. Компактность температурного пятна на аноде (поперечный размер ~2 мм, максимум 47 °С) подтверждает локальный характер энерговклада без глобального перегрева детали, однако истинная температура поверхности может быть выше измеренной из-за неопределённости эмиссивности растущей оксидной пленки.

Заключение. Экспериментально охарактеризован разряд между струйным электролитическим катодом и алюминиевым анодом при атмосферном давлении; показаны две устойчивые топологии горения, импульсная природа тока, спектральные маркеры и тепловая картина энерговклада. Результаты формируют базу для построения режимных карт локальной обработки алюминия и расширения технологических приложений. Полученные данные

составляют основу для построения карты режимов обработки алюминиевых изделий и могут быть расширены за счёт варьирования расхода, диаметра сопла, состава электролита и применения более скоростной диагностики. Направления дальнейших работ: стандартизация энергетических метрик, количественная декомпозиция источников излучения и масштабирование методики.

Ключевые слова: струйный электрод, алюминиевый анод, газовый разряд, импульсные токи, эмиссионная спектроскопия, линии Бальмера, концентрация электронов, тепловизионная диагностика, модификация поверхности

Благодарности. Коллектив авторов выражает благодарность кафедре лазерных и аддитивных технологий при ФГБОУ ВО «КНИТУ-КАИ» за предоставленное диагностическое оборудование.

Финансирование. Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 25–29–20147, <https://rscf.ru/project/25-29-20147/>

Для цитирования. Петряков С.Ю., Бельгибаев Э.Р., Гайсин А.Ф., Каюмов Р.Р. Электрический разряд между струйным электролитическим катодом и металлическим анодом. *Advanced Engineering Research (Rostov-on-Don)*. 2026;26(2):2245. <https://doi.org/10.23947/2687-1653-2026-26-2-2245>

Original Empirical Research

Electric Discharge between a Jet Electrolytic Cathode and a Metal Anode

Sergey Yu. Petryakov, Eduard R. Belgibaev, Almaz F. Gaisin , Rushan R. Kayumov 

Kazan National Research Technical University named after A. N. Tupolev – KAI, Kazan, Russian Federation

Abstract

Introduction. Gas discharges with liquid electrodes are considered as a promising tool for improving adhesion properties and preparing surfaces for coating application. Glow and arc discharges with electrolytic electrodes have been investigated in detail in the literature, but most studies focus on configurations with a stationary electrolyte. For “jet electrolytic cathode–metal anode” systems at atmospheric pressure, the discharge combustion modes, their stability limits, and the energy characteristics of the process are insufficiently systematized. This hinders the scalability of localized aluminum processing technologies. The objective of this study is to experimentally classify combustion modes and their stability regions, determine the electrical, spectral, and thermal parameters of the discharge, and substantiate practical modes for localized aluminum surface preparation for adhesion and coating.

Materials and Methods. To achieve this goal, a laboratory setup was built: a 3% NaCl jet served as the cathode, and an AMTs-40 (aluminum-manganese alloy in the RU system, ISO analog: AW-3003) aluminum plate served as the anode. The jet-anode assembly was placed in a temperature-controlled electrolytic cell with closed circulation of the solution. Typical conditions: $U \approx 600$ V, $v_k \approx 0.6–0.7$ m/s, $d \approx 2$ mm, $\sigma \approx 0.10–0.12$ $\Omega^{-1} \cdot \text{cm}^{-1}$. A power supply of up to 4 kV/10 A provided a wide range of settings. The diagnostics included oscillographic measurements, high-speed video recording (Casio EX-F1, 600–1200 fps), thermal imaging (FLIR A6500sc), and optical emission spectroscopy (OES) on a PLASUS EC 150201 MC spectrometer with electron density n_e estimated from Stark broadening of H_α .

Results. Two plasma localization topologies were detected: a contact zone on the triple gas-liquid-solid line and a jet breakup region. The current was pulsed with an amplitude of 0.8–1.6 A. The spectra were dominated by the Na I doublet (~589 nm), the OH(A–X) bands, and the H_α line; from $\Delta\lambda_L(H_\alpha) \approx 0.64$ nm, an estimate of $n_e \approx 6.4 \times 10^{16}$ cm^{-3} was obtained. Thermal imaging maps showed a maximum effective temperature of ~47°C at the point of contact, and an energy deposition zone elongated along the jet with a length of ~7 mm (diameter ~2 mm).

Discussion. The pulsed nature of the current with an amplitude of 0.8–1.6 A at 600 V indicates the periodic formation and breakdown of the current channel, which is typical for discharges with a nonstationary geometry of the cathode region and has been previously noted in studies on discharges with flowing jets. The estimate of the electron density $n_e \approx 6.4 \times 10^{16}$ cm^{-3} based on the Stark broadening of H_α falls within the range of $10^{15}–10^{17}$ cm^{-3} , characteristic of atmospheric discharges with liquid electrodes, and indicates a relatively dense plasma sufficient for effective surface activation. The dominance of Na I lines in the spectrum confirms the intense transfer of electrolyte components into the discharge gap, which is consistent with the aerosol sputtering mechanism in the near-cathode region. The compactness of the temperature spot on the anode (transverse size ~2 mm, maximum 47°C) confirms the localized nature of the energy deposition without global overheating of the component. However, the true surface temperature may be higher than the measured one due to the uncertainty in the emissivity of the growing oxide film.

Conclusion. A discharge between a jet electrolytic cathode and an aluminum anode at atmospheric pressure has been experimentally characterized. Two stable combustion topologies, the pulsed nature of the current, spectral markers, and a thermal energy deposition pattern are demonstrated. The results form the basis for constructing operational maps for local aluminum processing and expanding technology applications. The data obtained form the basis for constructing a map of aluminum processing modes and can be expanded through varying the flow rate, nozzle diameter, electrolyte composition, and using faster diagnostics. Future work includes standardizing the energy metrics, quantitatively decomposing the radiation sources, and scaling the methodology.

Keywords: jet electrode, aluminum anode, gas discharge, pulsed currents, emission spectroscopy, Balmer lines, electron concentration, thermal imaging diagnostics, surface modification

Acknowledgements. The team of authors appreciates the Department of Laser and Additive Technologies, KNITU-KAI, for the provided diagnostic equipment.

Funding Information. The research is done with the support from the Russian Science Foundation (grant no. 25–29–20147), <https://rscf.ru/project/25-29-20147/>

For Citation. Petryakov SYu, Belgibaev ER, Gaisin AF, Kayumov RR. Electric Discharge between a Jet Electrolytic Cathode and a Metal Anode. *Advanced Engineering Research (Rostov-on-Don)*. 2026;26(2):2245. <https://doi.org/10.23947/2687-1653-2026-26-2-2245>

Введение. Газоразрядная плазма, формируемая в межэлектродном промежутке, где один или оба электрода являются жидкостью, представляется одним из перспективных направлений исследований в области механики жидкости, газа и плазмы, а также современных технологий обработки материалов [1]. Одной из востребованных конфигураций выступает система со струйным электролитическим катодом и металлическим анодом, в которой функции катода выполняет проточная струя электролита [2]. Подобная схема позволяет формировать локальную катодную область с газоразрядной плазмой и обеспечивает гибкую настройку параметров процесса [3]. Локальный энергозатрат в зоне катодного пятна, эффективный теплоотвод через жидкие электроды, а также оперативное удаление продуктов реакции обуславливают высокую результативность данной конфигурации при локальной обработке поверхностей малогабаритных металлических изделий [4], проведении очистки [5], удалении заусенцев и нанесении функциональных покрытий [6].

Механизм разряда со струйным электролитическим катодом определяется сложным межфазным взаимодействием в трехфазном узле «газ – жидкость – твердое тело» [7]. На характер горения и устойчивость процесса существенное влияние оказывают электрические параметры (напряжение, ток, мощность, вид питания — постоянный или ВЧ-ток) [8], гидродинамика струи (расход, скорость течения, диаметр сопла, уровень турбулентности) [9], термические и массообменные явления (испарение, дегазация) [10], химический состав и удельная электропроводность электролита [11], а также давление и состав окружающей газовой среды [12]. Для таких систем характерны смена режимов горения, возникновение самовозбуждающихся колебаний и срывов, а также выраженная нелинейность вольтамперных характеристик [13]. В сравнении с разрядом на твердом катоде структура приэлектродного слоя у жидкого катода специфична: ключевую роль играют ионная бомбардировка поверхности струи, вторичная электронная эмиссия на границе раздела сред, микроплески и микроарзряды на газовых включениях, а также электродинамическая стабилизация или дестабилизация мениска [14].

Практическая значимость таких разрядов обусловлена возможностью направленного изменения микрорельефа и состояния приповерхностного слоя металлического анода без критического термического воздействия на деталь. Это позволяет: формировать активные функциональные группы; регулировать смачиваемость поверхности; проводить очистку от оксидных пленок и органических загрязнений; инициировать центры зародышеобразования для последующего осаждения покрытий; повышать показатели микротвердости и коррозионной стойкости. Локальный характер воздействия особенно актуален для малогабаритных деталей со сложной геометрией, где традиционные механические и электрохимические методы неприменимы. Для промышленного производства наиболее важной задачей остается определение оптимальных режимов обработки, связывающих характеристики разряда и параметры струи электролита.

Вместе с тем данная область исследований на сегодняшний день изучена недостаточно. Не в полной мере описаны условия перехода между различными формами горения разряда в зависимости от электродинамических и гидродинамических факторов. Требуется разработка математических моделей слоя в области жидкого катода, учитывающих процессы генерации парогазовой оболочки. Необходима систематизация режимов в виде карт, где электрические характеристики (удельный энергозатрат на единицу площади поверхности, вольтамперные кривые) сопоставлялись бы с итоговыми функциональными свойствами материала. С позиции диагностики востребованы: высокоскоростная визуализация межэлектродных процессов; прецизионная регистрация вольтамперных характеристик и осцилляций тока; оптическая эмиссионная спектроскопия для идентификации состава плазмы, определения концентрации и температуры электронов, а также температуры тяжелой компоненты.

Целью данной работы является установление форм горения электрического разряда между струйным электролитическим катодом и алюминиевым анодом, выявление областей их устойчивого существования, а также комплексное определение электрофизических, спектральных и тепловых характеристик. Полученные результаты ориентированы на создание научно обоснованных рекомендаций по финишной подготовке и модификации изделий из алюминия и его сплавов.

Материалы и методы. Зажигание и устойчивое горение струйного электрического разряда с жидкой плазмой образующей средой при локальном воздействии на металлический анод были реализованы на лабораторной установке, в которой проточная струя электролита выступает катодом, а металлическая пластина — анодом (рис. 1 а). Конструктивно узел «струя – анод» размещен в объеме электролитической ячейки (рис. 2 б), оснащённой системами подвода и отвода раствора, термостатирования и штатной вытяжной вентиляции рабочей зоны.

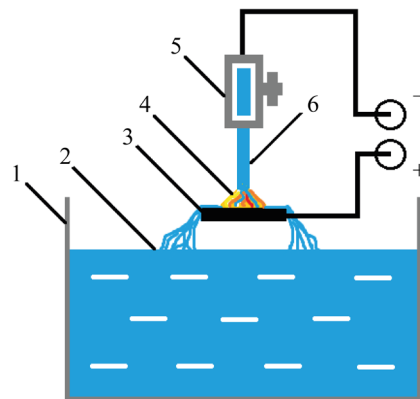


Рис. 1. Экспериментальная установка для зажигания газоразрядной плазмы:

- а — фотография экспериментальной установки; б — функциональная схема газоразрядной камеры для поддержания струйного разряда с жидким катодом при взаимодействии с поверхностью металлического анода, где:
 1 — электролитическая ячейка; 2 — электролит; 3 — металлический анод (алюминиевая пластина);
 4 — зона горения разряда; 5 — сопло подачи/регулировки струи; 6 — струя электролита (катод)

В качестве анода использовалась алюминиевая пластина марки АМц-40, закреплённая в ячейке; катод образовывала непрерывная струя 3 %-го водного раствора NaCl, приготовленного на очищенной водопроводной воде. Перед запуском на сопло и струю подавали отрицательный потенциал, на алюминиевую пластину — положительный. Струю формировали через сменное сопло; расход задавали регулирующим краном с контролем по расходомеру. Для стабильности характеристик раствора предусматривалось термостатирование: циркуляционный охладитель рефрижераторного типа удерживал температуру в заданных пределах, а обновление электролита осуществлялось по замкнутому контуру с фильтром грубой очистки для удаления механических примесей. Пары и аэрозоли из рабочей зоны удалялись стационарной вытяжкой. Все токоведущие и корпусные элементы имели защитное заземление.

Питание разряда обеспечивал высоковольтный источник до 4 кВ с номинальным током до 10 А и плавной регулировкой, включающий высоковольтный и низковольтный каналы. Это позволяло гибко задавать диапазоны напряжения и тока, а также запитывать вспомогательные датчики. Текущие значения U и I выводились на панельные индикаторы и дублировались на управляющем ПК для оперативного контроля. В типовых сериях опытов параметры составляли: напряжение $U = 0,1-1,1$ кВ; давление $p \approx 10^5$ Па (атмосферное); скорость струи $v_k = 0,5-0,7$ м/с; диаметр струи $d = 2$ мм; длина струи $l = 15$ мм; удельная электропроводность раствора $\sigma = 0,10-0,12$ Ом⁻¹·см⁻¹; температура $T = 12-64$ °С. Полярность электродов во всех режимах сохранялась: струя — катод, пластина — анод.

Диагностический комплекс включал взаимодополняющие методы визуализации, теплового и электрического контроля, а также оптическую эмиссионную спектроскопию.

1. Высокоскоростная видеосъёмка динамики факела и приэлектродных структур выполнялась камерой «Casio EX-F1» со скоростями 600 и 1200 к/с. Камеру устанавливали на штатив на расстоянии около 300 мм от зоны разряда; передача и первичная обработка данных производились на ПК с использованием ПО «HX Link» и «Movavi Video Editor 14 Plus». Съёмка позволяла фиксировать форму и колебания катодной струи, а также эволюцию анодного пятна.

2. Для картирования температурного поля на поверхности анода и в окрестности катодной струи применялась тепловизионная камера «FLIR A6500sc» (640×512 пикселей; 3,6–4,9 мкм) с калибровкой по многоволновому пиromетру. Это компенсировало изменения эффективной излучательной способности, связанные с образованием и ростом оксидной плёнки на алюминии. Анализ термограмм выполнялся в программном пакете «ALTAIR v5.91.010».

3. Пульсации тока и напряжения регистрировались цифровыми осциллографами «GDS-806S» и «GOS-6030». Для синхронизации электрических сигналов с оптическими событиями использовался фотодиодный датчик излучения разряда, подключённый к осциллографу. Такой подход обеспечивал привязку моментов зажигания, переходов между формами горения и всплесков к визуально наблюдаемым изменениям факела.

4. Оптическая эмиссионная спектроскопия осуществлялась на оптико-волоконном спектрометре «PLASUS EC 150201 MC» в диапазоне 195–1105 нм. Излучение собиралось коллиматором, подведённым к зоне горения на расстоянии 100–200 мм. Градуировку аппаратной функции проводили по источнику «СИРШ 6-100»; аппаратная ширина составила $\Delta\lambda_g \approx 1$ нм. Спектры сопоставлялись с базой данных NIST. По профилям линий водорода серии Бальмера оценивали концентрацию электронов (по уширению H_α).

Набор средств и режимов обеспечил репрезентативные, воспроизводимые измерения и сопоставление электрических, спектральных, тепловых и визуальных характеристик струйного разряда с жидким катодом и локального воздействия на поверхность металлического анода.

Результаты исследования. На фотографиях (рис. 2) показано, что при полярности «струйный электролитический катод — алюминиевый анод» разряд при $U = 600$ В, $p = 10^5$ Па и скорости струи $v_k = 0,6$ м/с локализуется в двух характерных областях: 1 — в зоне непосредственного контакта струи с поверхностью анода (рис. 2 а) и 2 — в районе распада струи (рис. 2 б).

В первом случае формируется приэлектродная светоизлучающая область, привязанная к «пятну контакта» и линии тройного сечения «газ – жидкость – твердое тело». Во втором — свечение и микроразрядные события возникают на шейках и каплях распадающейся струи, где кривизна поверхности и локальные газовые включения усиливают поле и уменьшают эффективную длину промежутка.

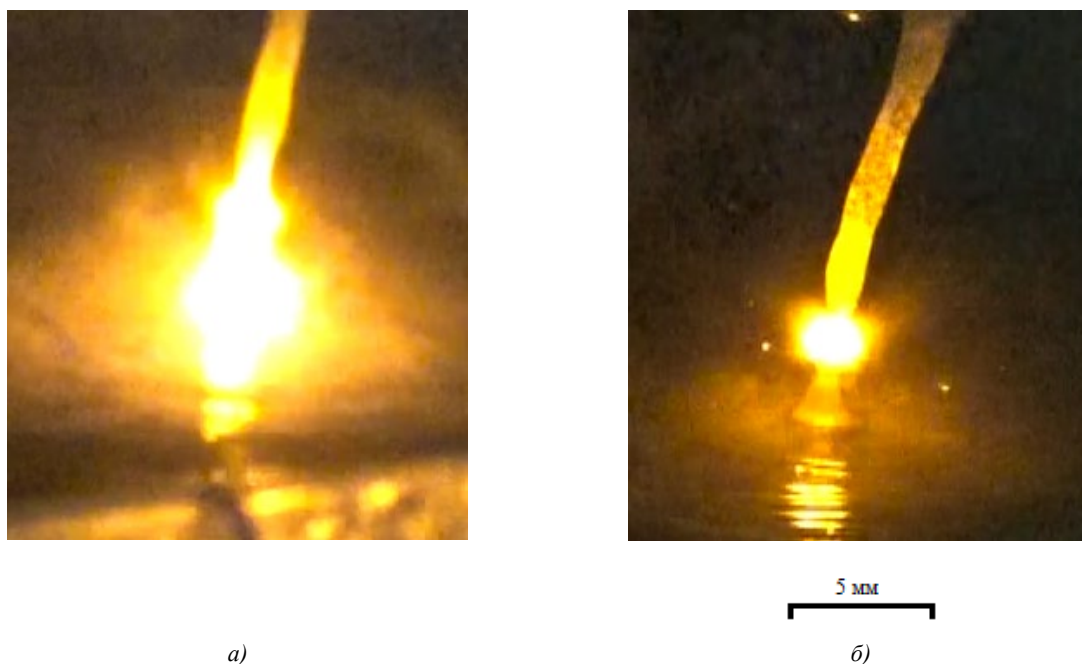


Рис. 2. Струйный электрический разряд между струйным анодом и алюминиевым катодом при $U = 600$ В, $I = 1,6$ А, $p = 10^5$ Па, $v_k = 0,6$ м/с: а — на границе между струей и металлической поверхностью; б — в зоне распада струи

Характерная жёлтая окраска факела в обоих случаях обусловлена главным образом интенсивным излучением резонансного дублета натрия (≈ 589 нм), возникающим за счёт испарения/аerosольного выброса Na-содержащих компонентов из струи 3 %-го раствора NaCl в прикатодной зоне и их последующей диссоциации-возбуждения в объёме разряда. Вклад непрерывного излучения от разогретых aerosольных частиц и локальных оксидных включений может придавать оранжево-жёлтый оттенок в моменты пикового энерговклада, но остаётся вторичным по отношению к линиям Na.

Осциллограммы тока (рис. 3) при фиксированном напряжении $U = 600$ В демонстрируют импульсный характер проводимости: ток реализуется сериями импульсов амплитудой порядка 0,8–1,6 А. Такая интермиттирующая структура соответствует чередованию стадий усиления и ослабления эмиссии электронов на границе газ — жидкость и периодическому «переключению» канала проводимости между двумя геометриями — «пятно на поверхности металлического электрода» и «в зоне распада струи».

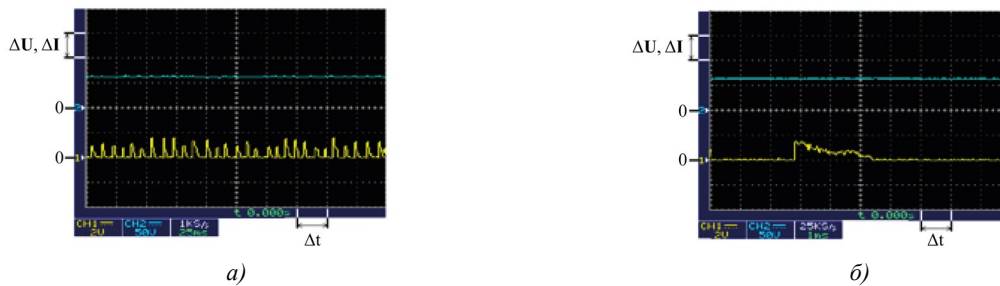


Рис. 3. Осциллограммы колебания тока и напряжения разряда между струйным катодом и алюминиевым анодом:
 а — при $p = 10^5$ Па, $\Delta U = 500$ В, $\Delta I = 2$ А, $\Delta t = 25$ мс; б — при $p = 10^5$ Па, $\Delta U = 500$ В, $\Delta I = 2$ А, $\Delta t = 5$ мс

Гидрогазодинамические процессы, включая образование газовых пузырьков, возникновение конвективных потоков, а также специфику течения и скорость струи — наряду с сопутствующими вариациями межэлектродного расстояния и геометрии катодного пятна — обуславливают флуктуации плотности тока и напряжённости электромагнитного поля. Данные явления фиксируются на осциллограмме в виде характерных импульсных областей (рис. 3).

Электрические сигналы, полученные при помощи осциллографа, были сопоставлены с данными оптической регистрации свечения разряда. Установлено, что импульсы тока по времени коррелируют с возникновением интенсивного излучения в зоне горения. Это свидетельствует о том, что определяющее значение в инициации импульсов имеют быстротекающие микрособытия в прикатодной области, трансформирующие условия формирования катодного слоя и провоцирующие микроаряды по направлению к аноду.

В данной конфигурации электродов источниками первичных электронов, для лавинной ионизации и последующей ионизации в объеме могут выступать следующие механизмы образования заряженных частиц: (1) вторичная электронная эмиссия с поверхности жидкого катода под действием бомбардировки положительными ионами и быстрыми нейтральными частицами; (2) автоэлектронная эмиссия с сильно искривлённых участков, где локально возрастает напряжённость поля; (3) фотоэлектронная эмиссия с поверхности струи под действием излучения из объёма разряда; (4) эмиссия из газовых пузырьков, прилегающих к катоду, где пониженная эффективная работа выхода и концентрация поля облегчают инжекцию электронов; (5) отрыв электронов от отрицательных ионов в приэлектродном слое.

На рис. 4 приведён эмиссионный спектр излучения плазмы разряда между струйным электролитическим катодом и алюминиевым анодом с идентифицированными полосами и линиями.

Регистрируются полосы ОН (А→Х), а также атомарные линии Н I, Na I, N I и К I. Наличие интенсивного резонансного дублета Na I ($\approx 589,0/589,6$ нм) согласуется с визуально наблюдаемой жёлтой окраской факела: натрий попадает в разрядную зону из 3 %-го раствора NaCl посредством испарения из прикатодной области, после чего возбуждается в объёме плазмы.

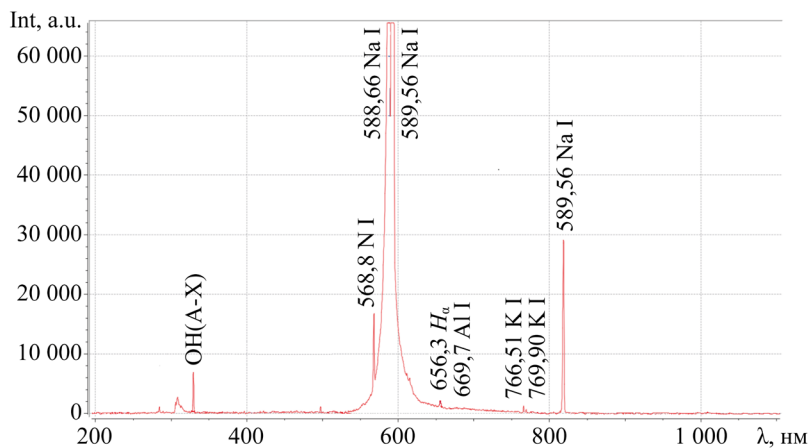


Рис. 4. Спектр излучение плазмы разряда между струйным катодом и алюминиевым анодом с отождествленными спектральными линиями

Аппаратное уширение оценивали по оптически тонкой линии К I (769,9 нм); минимальная полуширина узких линий составила $\Delta\lambda_G \approx 1,0$ нм и далее принималась как гауссова составляющая аппаратной функции. Наблюдаемые профили линий аппроксимировали фойгтовым контуром; для связи фойгтовой ($\Delta\lambda_F$), лоренцевой ($\Delta\lambda_L$) и гауссовой ($\Delta\lambda_G$) полуширин использовали приближение [15]:

$$\Delta\lambda_F \approx 0,5346 \cdot \Delta\lambda_L + \sqrt{0,2166 \cdot \Delta\lambda_L^2 + \Delta\lambda_G^2}.$$

Из него находили $\Delta\lambda_L$ при известных $\Delta\lambda_F$ и $\Delta\lambda_G$, тем самым исключая вклад приборного уширения.

Для линии H_α (656,28 нм) измеренная полуширина фойгтовского контура составила $\Delta\lambda_F(H_\alpha) = 1,38$ нм. С учётом аппаратной составляющей получена лоренцева полуширина $\Delta\lambda_L(H_\alpha) \approx 0,64$ нм. По температурно-зависимым коэффициентам рассчитана электронная концентрация $n_e \approx 6,4 \times 10^{16}$ см⁻³.

Такое значение концентрации электронов характерно для атмосферного давления, где доминирует линейное штарковское уширение водородных линий.

В данной серии H_β (486,13 нм) не зарегистрирована из-за низкого отношения сигнал/шум в канале и настройки экспозиции под яркие жёлтые линии Na I, что не препятствует оценке n_e по H_α .

Таблица 1

Сводные спектральные параметры для оценки n_e по линии H_α

Параметр	Значение	Примечание
$\Delta\lambda_F(H_\alpha)$	1,38 нм	Полуширина фойгтовского контура
$\Delta\lambda_L(H_\alpha)$	$\approx 0,64$ нм	Лоренцева составляющая (без приборного уширения)
n_e	$\approx 6,4 \times 10^{16}$ см ⁻³	Оценка по штарковскому уширению H_α

Совокупность наблюдаемых полос и линий подтверждает смешанную природу плазмообразования (воздух + продукты распыления электролита). Жёлтая окраска факела обусловлена доминированием Na I линий, а оценка по уширению H_α даёт электронную концентрацию порядка 10^{16} см⁻³ при исследуемых режимах.

Термографический анализ зоны разряда. На термограммах (рис. 5) за начало координат принято положение, соответствующее области контакта струйного электролитического катода с алюминиевым анодом (линия «газ — жидкость — твёрдое тело»).

В этой точке фиксируется максимальная эффективная температура $T = 47$ °С. При движении к источнику струи электролита, то есть вдоль струи, температура убывает в пределах первых 7 мм, что указывает на вытянутую вдоль струи плазменную область длиной порядка 7 мм и эффективным поперечным размером 2 мм. Вне плазменной зоны профиль температуры переходит к экспоненциальному спаду до температуры окружающей среды. При движении в сторону алюминиевого анода температура также резко падает до уровня 22 °С. Такая асимметрия профиля объясняется высокой теплопроводностью алюминия и эффективным теплоотводом в объём детали, а также интенсивным конвективным охлаждением прилегающим электролитом. Температурное «пятно» на анодной поверхности компактно и привязано к зоне контакта. Это соответствует картине направленного энергоклада из разряда, вытянутого по струе катода.

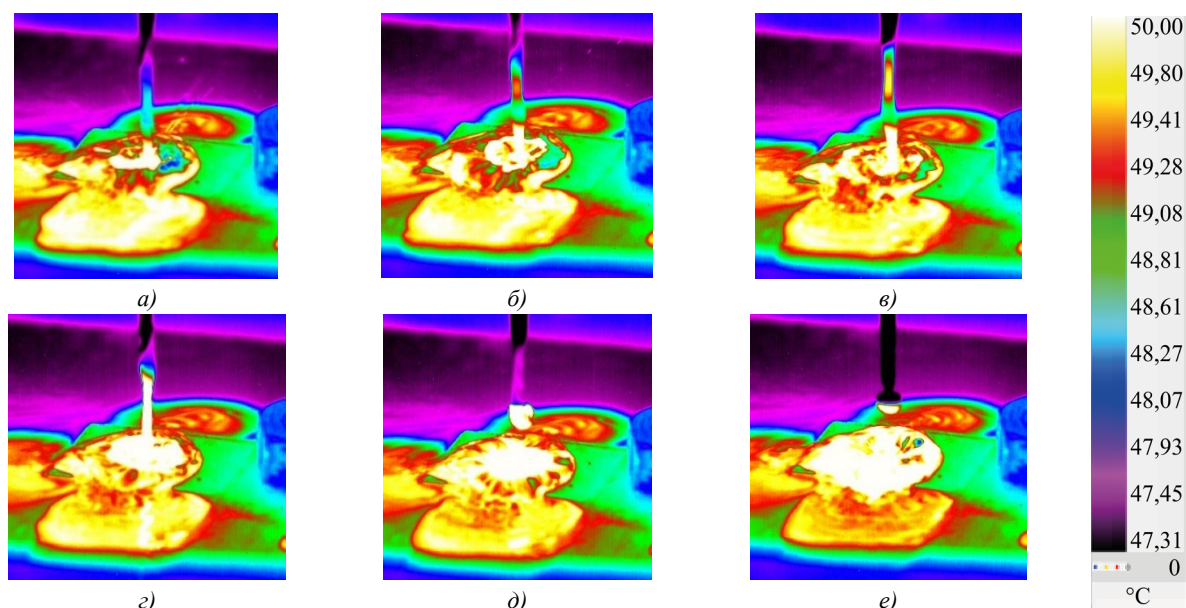


Рис. 5. Динамика распределения температуры струйного электролитического катода (термограммы, $t = 0-5$ с, $\Delta t = 1$ с): а — 0 с; б — 1 с; в — 2 с; г — 3 с; д — 4 с; е — 5 с

Обсуждение. Исходя из полученных данных, следует, что плазменные структуры локализуются в двух областях системы: (1) — в области контакта струйного электрода с поверхностью обрабатываемого изделия и (2) — в зоне утончения и распада струйного электрода.

В первом случае максимальный энерговклад разряда локализуется в области катодного пятна на поверхности металлического анода, во втором — смещается к области сужения и распада струйного электрода, где геометрия поверхности и парогазовый промежуток усиливают электромагнитное поле. Такое поведение струйного электрода объясняет изменения проводимости и, как следствие, колебания тока в диапазоне 0,8 – 1,6 А при напряжении около 600 В.

Импульсный характер горения разряда обусловлен взаимосвязью электрических параметров разряда, катодного слоя и гидродинамики струи. Динамика течения струи, сопровождающаяся образованием локальных областей сужения и распада струи, приводит к нестационарному изменению геометрии катодной области и изменению напряженности электрического поля. В этих условиях формируются кратковременные микроразряды в парогазовой области между анодом и катодом, что проявляется в виде последовательных импульсов тока, коррелирующих со свечением плазмы разряда. Запуск таких импульсов определяется совокупным вкладом различных механизмов электронной эмиссии, включая вторичную эмиссию под действием ионной бомбардировки, автоэлектронную эмиссию, а также инжекцию электронов в объем плазмы с поверхности прикатодного слоя.

Анализ эмиссионных спектров указывает на комбинированный характер газоразрядной плазмы, формируемой как за счёт компонентов окружающего воздуха, так и элементов, дислоцированных из электролита. Интенсивное излучение фиксируется на линии Na I в области около 589 нм, что определяет преобладание желтого цвета горения разряда. Регистрация полос ОН (А–Х) и линии H_{α} свидетельствует о протекании газофазных процессов с участием водорода и гидроксильных радикалов. Оценка электронной концентрации, выполненная по Штарковскому уширению линии H_{α} ($\Delta\lambda_L \approx 0,64$ нм), составляет $n_e \approx 6,4 \times 10^{16}$ см⁻³.

Термографические измерения демонстрируют формирование локализованной зоны нагрева на поверхности металлического анода с максимальной температурой около 47 °С. Пространственная асимметрия температурного поля обусловлена высокой теплопроводностью алюминия, обеспечивающей интенсивный отвод тепла в объём материала и конвективным охлаждением со стороны электролита. Зафиксированные температурные значения не определяют механизм активации поверхности алюминия. Изменение свойств поверхностного слоя реализуется за счёт неравновесного воздействия газоразрядной плазмы, включающего поток заряженных частиц, активные химические компоненты и локальные электрические поля в прианодной области, а не вследствие термического разрушения оксидной плёнки Al_2O_3 .

С точки зрения практической реализации процесс характеризуется наличием устойчивых режимных областей, определяемых совокупностью электрических параметров (напряжение, ток), гидродинамических характеристик струи (скорость, диаметр, длина промежутка) и электропроводности раствора.

К ограничениям проведённого исследования следует отнести конечное спектральное разрешение используемого оборудования (~1 нм), что накладывает ограничения на интерпретацию узких линий и делает предпочтительным использование линии H_{α} при оценке электронной концентрации. Дополнительным фактором является фиксированный состав электролита (3 % NaCl), тогда как изменение ионного состава и pH может существенно влиять на кинетику возбуждения и тепловой баланс системы. Указанные обстоятельства определяют направления дальнейших исследований.

Осмотр обработанной поверхности алюминиевого анода показывает формирование локализованной зоны воздействия без признаков оплавления. Это указывает на мягкий характер плазменно-жидкостного воздействия, обеспечивающего очистку поверхности при сохранении геометрии детали. Количественная оценка изменений шероховатости, смачиваемости и микромеханических свойств требует дальнейшего экспериментального анализа.

С прикладной точки зрения установленные импульсные режимы и наличие двух устойчивых типов горения электрического разряда создают предпосылки для управляемого изменения энерговклада за счёт варьирования параметров струи и электрических характеристик. Это позволяет реализовать переход от режимов мягкой очистки поверхности к контролируемому изменению морфологии поверхности без существенного теплового воздействия на материал, что важно для разработки компактных технологических решений подготовки алюминиевых поверхностей под нанесение покрытий и обеспечение адгезии.

Заключение. Выполнено экспериментальное исследование электрического разряда в системе «струйный электролитический катод — алюминиевый анод» при атмосферном давлении. Установлены две топологии локализации плазмы — контактная зона на тройной линии и область распада струи. В обоих случаях ток носит импульсный характер с амплитудой порядка 0,8 – 1,6 А. Оптическая эмиссионная спектроскопия подтверждает смешанную природу плазмы (воздух + продукты распыления электролита) и доминирование дублета Na I, а оценка по уширению H_{α} даёт концентрацию электронов $n_e \approx 10^{16}$ см⁻³. Термовизионные данные указывают на максимум эффективной температуры около 47 °С на стороне контакта и вытянутую вдоль струи зону энерговклада длиной около 7 мм. Показано, что механизм запуска импульсов обусловлен электромеханической обратной связью между катодным слоем и гидродинамической струей. Возможные источники первичных электронов включают вторичную, авто- и фотоэмиссию, а также

эмиссию из газовых микрополостей. Практически это позволяет целенаправленно выбирать режимы (скорость/диаметр струи, электропроводность, напряжение) для деликатной активации, очистки и микротекстурирования алюминиевых поверхностей. Перспективы дальнейших исследований связаны со стандартизацией энергетических метрик, количественной декомпозицией вкладов излучающих компонентов и расширением для построения режимных карт.

Представленные результаты формируют физическую основу для последующего количественного анализа качества поверхности и построения режимных карт плазменно-жидкостной обработки алюминиевых изделий.

Список литературы / References

1. Haixia Wu, Wei Ye, Wang Shen, Quanfa Zhao. Tetracycline Degradation in the System of Peracetic Acid Activation by Liquid Discharge Plasma. *Separation and Purification Technology*. 2025;354(2):128783. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2024.128783>
2. Kovačević VV, Sretenović GB, Obradović BM, Kuraica MM. Low-Temperature Plasmas in Contact with Liquids — A Review of Recent Progress and Challenges. *Journal of Physics D: Applied Physics*. 2022;55(47):473002. <https://doi.org/10.1088/1361-6463/ac8a56>
3. Vasilev M, Conlon P, Bohl D, Thagard SM. The Effect of Discharge Frequency of a Gas–Liquid Plasma Reactor on Bulk Liquid Transport and Removal of Organic Contaminants. *Plasma Chemistry and Plasma Processing*. 2022;42(4):759–783. <https://doi.org/10.1007/s11090-022-10246-2>
4. Srivastava T, Simeni MS, Nayak G Bruggeman PJ. Self-organized Patterns at the Plasma–Liquid Anode Interface in a Helium Glow Discharge: Temporal Development and Mechanisms. *Plasma Sources Science and Technology*. 2022;31(8):085010. <https://doi.org/10.1088/1361-6595/ac83ed>
5. Bruggeman P, Garrick SC, Kushner MJ, Locke BR, Gardeniers JGE, Graham WG, et al. Plasma–Liquid Interactions: A Review and Roadmap. *Plasma Sources Science and Technology*. 2016;25(5):053002. <https://doi.org/10.1088/0963-0252/25/5/053002>
6. Kashapov N, Kashapov R, Kashapov L. Influence of the Electrolytic Cathode Temperature on the Self-sustaining Mechanism of Plasma-Electrolyte Discharge. *Journal of Physics D: Applied Physics*. 2018;51(49):494003. <https://doi.org/10.1088/1361-6463/aae334>
7. Yutong Yang, Bing Sun, Shaohua Sun, Xiaomei Zhu, Jinglin Liu. Heterogeneous Liquid Discharge Cracking of n-hexadecane as a Heavy Oil Model Compound: A Way to Generate Plasma in Liquid Hydrocarbons at Low Voltage. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*. 2024;177:106348. <https://doi.org/10.1016/j.jaap.2024.106348>
8. Акишев Ю.С., Грушин М.Е., Каральник В.Б., Монич А.Е., Панькин М.В., Трушкин Н.И. и др. Создание неравновесной плазмы в гетерофазных средах газ–жидкость при атмосферном давлении и демонстрация её возможностей для стерилизации. *Физика плазмы*. 2006;32(12):1142–1152. <https://doi.org/10.1134/S1063780X06120087>
9. Akishev YuS, Grushin ME, Karalnik VB, Monich AE, Pan'kin MV, Trushkin NI, et al. Generation of Nonequilibrium Plasma in Heterogeneous Atmospheric-Pressure Gas–Liquid Media and Demonstration of Its Sterilization Ability. *Plasma Physics Reports*. 2006;32(12):1142–1152. <https://doi.org/10.1134/S1063780X06120087>
10. Баринов Ю.А., Школьник С.М. Разряд с жидким неметаллическим катодом (водопроводная вода) в потоке воздуха атмосферного давления. *Журнал технической физики*. 2016;86(11):155–158. <https://doi.org/10.21883/jtf.2016.11.43833.1833>
11. Barinov YuA, Shkolnik SM. Discharge with a Liquid Non-metallic Cathode (Tap Water) in Atmospheric-Pressure Air Flow. *Technical Physics*. 2016;86(11):155–158. <https://doi.org/10.21883/jtf.2016.11.43833.1833>
12. Сироткин Н.А., Титов В.А. Экспериментальное исследование нагрева жидкого катода и переноса его компонентов в газовую фазу под действием разряда постоянного тока. *Прикладная физика*. 2016;(6):25–31.
13. Sirotkin NA, Titov VA. Experimental Study of the Liquid Cathode Heating and Transfer of Its Components to a Gas Phase under Action of a Direct Current Discharge. *Applied Physics*. 2016;(6):25–31.
14. Аверин К.А., Лебедев Ю.А., Шахатов В.А. Некоторые результаты исследования СВЧ-разряда в жидких тяжёлых углеводородах. *Прикладная физика*. 2016;(2):41–45.
15. Averin KA, Lebedev YuA, Shakhmatov VA. Some Results of Studies of a Microwave Discharge in Liquid Heavy Hydrocarbons. *Applied Physics*. 2016;(2):41–45.
16. Гайсин Ал.Ф., Гайсин Ф.М., Желтухин В.С., Сон Э.Е. Высокочастотный разряд со струйным электролитическим электродом. *Физика плазмы*. 2022;48(1):48–54. <https://doi.org/10.1134/S1063780X22010068>
17. Gaisin AIF, Gaisin FM, Zheltukhin VS, Son EE. High-Frequency Discharge with a Jet Electrolytic Electrode. *Plasma Physics Reports*. 2022;48(1):48–54. <https://doi.org/10.1134/S1063780X22010068>
18. Гайсин Ал.Ф., Каюмов Р.Р., Купутдинова А.И., Марданов Р.Р. Плазменно-жидкостной рециклинг металлического порошка для 3D-печати. *Физика и химия обработки материалов*. 2023;(1):37–44. <https://doi.org/10.30791/0015-3214-2023-1-37-44>
19. Gaisin AI, Kayumov R, Kuputdinova A, Mardanov R. Plasma–Liquid Recycling of Metal Powder for 3D Printing. *Physics and Chemistry of Material Treatment*. 2023;(1):37–44. <https://doi.org/10.30791/0015-3214-2023-1-37-44>

14. Петряков С.Ю., Мирханов Д.Н., Гайсин А.Ф., Басыров Р.Ш., Кашапов Н.Ф. Разряд постоянного тока между металлическим анодом и жидким неметаллическим катодом. *Прикладная механика и техническая физика*. 2022;63(5):20–32. <https://doi.org/10.15372/PMTF20220502>

Petryakov SYu, Mirkhanov DN, Gaisin AF, Basyrov RSh, Kashapov NF. DC Discharge between a Metal Anode and a Liquid Non-metallic Cathode. *Journal of Applied Mechanics and Technical Physics*. 2022;63(5):20–32. <https://doi.org/10.15372/PMTF20220502>

15. Очкин В.Н. *Спектроскопия низкотемпературной плазмы*. Монография. Москва: Физматлит; 2006. 472 с. Ochkin VN. *Low-Temperature Plasma Spectroscopy*. Moscow: Fizmatlit; 2006. 472 p. (In Russ.)

Об авторах:

Сергей Юрьевич Петряков, ассистент кафедры «Техническая физика» Казанского национального исследовательского технического университета им. А.Н. Туполева – КАИ» (420111, Российская Федерация, г. Казань, ул. К. Маркса, 10), [SPIN-код](#), serioga_com@mail.ru

Эдуард Рустемович Бельгибаев, ассистент кафедры «Техническая физика» Казанского национального исследовательского технического университета им. А.Н. Туполева – КАИ» (420111, Российская Федерация, г. Казань, ул. К. Маркса, 10), [SPIN-код](#), erbelgibaev@kai.ru

Алмаз Фивзатович Гайсин, доктор технических наук, доцент, заведующий кафедрой «Техническая физика» Казанского национального исследовательского технического университета им. А.Н. Туполева – КАИ» (420111, Российская Федерация, г. Казань, ул. К. Маркса, 10), [SPIN-код](#), [ORCID](#), [ScopusID](#), [ResearcherID](#), almaz87@mail.ru

Рушан Рашитович Каюмов, кандидат технических наук, доцент кафедры «Техническая физика» Казанского национального исследовательского технического университета им. А.Н. Туполева – КАИ» (420111, Российская Федерация, г. Казань, ул. К. Маркса, 10), [SPIN-код](#), [ORCID](#), [ScopusID](#), [ResearcherID](#), rushan_250189033@mail.ru

Заявленный вклад авторов:

С.Ю. Петряков: написание рукописи — внесение замечаний и исправлений.

Э.Р. Бельгибаев: проведение исследования.

Р.Р. Каюмов: проведение исследования.

А.Ф. Гайсин: научное руководство.

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

About the Authors:

Sergey Yu. Petryakov, Assistant Professor of the Technical Physics Department, Kazan National Research Technical University named after A.N. Tupolev – KAI (10, K.Marx Str., Kazan 420111, Russian Federation), [SPIN-code](#), serioga_com@mail.ru

Eduard R. Belgibaev, Assistant Professor of the Technical Physics Department, Kazan National Research Technical University named after A.N. Tupolev – KAI (10, K.Marx Str., Kazan 420111, Russian Federation), [SPIN-code](#), erbelgibaev@kai.ru

Almaz F. Gaisin, Dr.Sci. (Eng.), Associate Professor, Head of the Technical Physics Department, Kazan National Research Technical University named after A.N. Tupolev – KAI (10, K.Marx Str., Kazan 420111, Russian Federation), [SPIN-code](#), [ORCID](#), [ScopusID](#), [ResearcherID](#), almaz87@mail.ru

Rushan R. Kayumov, Cand.Sci. (Eng.), Associate Professor of the Technical Physics Department, Kazan National Research Technical University named after A.N. Tupolev – KAI (10, K.Marx Str., Kazan 420111, Russian Federation), [SPIN-code](#), [ORCID](#), [ScopusID](#), [ResearcherID](#), rushan_250189033@mail.ru

Claimed Contributorship:

SYu Petryakov: writing – review & editing.

ER Belgibaev: investigation.

RR Kayumov: investigation.

AF Gaisin: supervision.

Conflict of Interest Statement: the authors declare no conflict of interest.

All authors have read and approved the final version of manuscript.

Поступила в редакцию / Received 26.02.2026

Поступила после рецензирования / Reviewed 25.03.2026

Принята к публикации / Accepted 01.04.2026

МЕХАНИКА MECHANICS



УДК 624.012.45:004.8

Оригинальное эмпирическое исследование

<https://doi.org/10.23947/2687-1653-2026-26-2-2285>

Модель машинного обучения для определения предельно допустимого тепловыделения бетона к 28-м суткам в массивных монолитных фундаментных плитах



EDN: KRLFMB

Т.Н. Кондратьева , В.С. Тюрина , А.С. Чепурненко  

Донской государственный технический университет, г. Ростов-на-Дону, Российская Федерация

✉ anton_chepurnenk@mail.ru

Аннотация

Введение. Температурное трещинообразование представляет собой серьезную проблему для массивных монолитных конструкций. Главный метод снижения этого риска — контроль общего тепловыделения в процессе гидратации цемента. Опубликованные научные работы посвящены решению прямой задачи оценки температурных напряжений при заданных условиях, включая экзотермию бетонных смесей. Цель исследования — решение обратной задачи, т.е. создание надежной модели машинного обучения, способной прогнозировать максимально допустимое общее тепловыделение к возрасту 28 дней (Q_{max}). Реализация предложенного подхода позволит контролировать трещиностойкость массивных фундаментных плит.

Материалы и методы. Для построения модели машинного обучения сформировали обучающий датасет из 9375 образцов путем конечноэлементного параметрического моделирования. Модель учитывает шесть входных параметров: толщину фундаментной плиты, коэффициент теплоотдачи верхней поверхности, температуру окружающей среды, класс бетона по прочности на сжатие, начальную температуру и темп твердения бетона. Для повышения точности прогнозирования использовался алгоритм CatBoost¹ с гиперпараметрами, настроенными по байесовской оптимизации. Качество прогнозирования оценивали по средней абсолютной, средней абсолютной процентной, среднеквадратичной ошибке, корню из нее и коэффициенту детерминации. Ценность параметров для прогноза определили методом, основанным на теории Шепли.

Результаты исследования. Обученная модель продемонстрировала высокую точность. Средняя абсолютная процентная ошибка (MAPE)² на обучающем наборе — 0,52 %. Коэффициент детерминации — 0,99 на обучающем наборе данных и 0,98 — на независимом тестовом. Это указывает на хорошее соответствие в пределах рассмотренных диапазонов входных параметров. Анализ Sharp³ выявил два главных фактора Q_{max} : коэффициент теплоотдачи и толщина плиты (значимость 0,57 и 0,48 соответственно). По значимости параметры распределились так: теплоотдача поверхности — 96 %, толщина плиты — 75 %, температура среды — 61 %, темп твердения — 35 %, класс бетона — 17 %, начальная температура смеси — 14 %.

Обсуждение. Корреляция признаков обусловлена особенностями физических процессов и моделирования. Значимый показатель для температуры окружающей среды и начальной температуры смеси ($\rho = 0,63$) объясняется условием обучения модели. При формировании датасета максимальная начальная температура бетона ограничивалась температурой окружающей среды. Слабая положительная связь класса бетона с Q_{max} объясняется способностью конструкций из высокопрочного бетона выдерживать более высокие температурные градиенты. Sharp-анализ позволил уточнить: быстрое твердение при высокой температуре сокращает Q_{max} , а медленное при низкой температуре — увеличивает.

¹ От англ. categorical boosting — категориальное повышение.

² От англ. mean absolute percentage error — средняя абсолютная процентная ошибка.

³ От англ. Shapley additive explanations — аддитивное объяснение на основе теории игр Шепли.

Заключение. Разработанная модель машинного обучения как вспомогательный вычислительный инструмент оптимизирует выбор состава бетона при проектировании. Байесовская оптимизация гиперпараметров обеспечила высокое качество работы алгоритма по метрикам: MAE = 0,67; MSE = 1,78; RMSE = 1,33; MAPE = 0,52 %. Три ограничения модели: неучтенные быстроснабжаемая ползучесть бетона, внешние ограничения деформации и случаи использования плит для трансферных конструкций.

Ключевые слова: тепловыделение бетона, трещинообразование в бетонных плитах, гарантированное прогнозирование трещиностойкости, критерий трещиностойкости, выбор состава бетона при проектировании





Благодарности. Авторы выражают благодарность редакции и рецензентам за внимательное отношение к статье и замечания, которые позволили повысить ее качество.

Финансирование. Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 25-19-00164, <https://rscf.ru/project/25-19-00164/>

Для цитирования. Кондратьева Т.Н., Тюрин В.С., Чепурненко А.С. Модель машинного обучения для определения предельно допустимого тепловыделения бетона к 28-м суткам в массивных монолитных фундаментных плитах. *Advanced Engineering Research (Rostov-on-Don)*. 2026;26(2):2285. <https://doi.org/10.23947/2687-1653-2026-26-2-2285>

Original Empirical Research

Machine Learning Model for Determining the 28-day Limit of Concrete Heat Release in Massive Monolithic Foundation Slabs

Tatiana N. Kondratieva , Vasilina S. Tyurina , Anton S. Chepurnenko  

Don State Technical University, Rostov-on-Don, Russian Federation

 anton_chepurnenk@mail.ru

Abstract

Introduction. Thermal cracking is a significant challenge for massive monolithic structures. The primary approach to mitigating this risk is to control the overall heat release during cement hydration. Published scientific papers address the direct problem of assessing thermal stresses under given conditions, including the exothermic properties of concrete mixtures. The objective of the study is to solve the inverse problem, that is, to create a reliable machine learning model to predict the 28-day maximum allowable total heat release (Q_{max}). Implementation of the proposed approach will enable monitoring the crack resistance of massive foundation slabs.

Materials and Methods. To build the machine learning model, a training dataset of 9375 samples was created using finite element parametric modeling. The model takes into account six input parameters: foundation slab thickness, upper surface heat transfer coefficient, ambient temperature, concrete compressive strength class, initial temperature, and concrete hardening rate. To improve forecast accuracy, the CatBoost (categorical boosting) algorithm was used with hyperparameters tuned by Bayesian optimization. Forecast quality was assessed using the mean absolute error, mean absolute percentage error, mean square error, root mean square error, and the coefficient of determination. The value of the parameters for forecasting was determined by a method based on the Shapley theory.

Results. The trained model demonstrated high accuracy. The mean absolute percentage error (MAPE) on the training set was 0.52%. The coefficient of determination was 0.99 on the training dataset, and 0.98 — on the independent test dataset. This indicated good agreement within the considered ranges of input parameters. Shap (Shapley additive explanations) analysis identified two key factors for Q_{max} : heat transfer coefficient and slab thickness (with significance values of 0.57 and 0.48, respectively). The parameters ranked by significance were as follows: surface heat transfer — 96%, slab thickness — 75%, ambient temperature — 61%, hardening rate — 35%, concrete grade — 17%, and initial temperature of the mix — 14%.

Discussion. The feature correlation was dictated by both the physical processes involved and the modeling methodology. The relatively high correlation between ambient temperature and initial mix temperature ($\rho = 0.63$) is explained by the conditions under which the model was trained. During dataset construction, the maximum initial concrete temperature was constrained by the ambient temperature. The weak positive correlation between concrete grade and Q_{max} is explained by the ability of high-strength concrete structures to withstand higher temperature gradients. Shap analysis allowed us to clarify: fast hardening at high temperatures reduced Q_{max} , while slow hardening at low temperatures increased it.

Conclusion. The machine learning model developed in this study provides an auxiliary computational framework for optimizing concrete composition selection during the design process. Bayesian optimization of hyperparameters provided high quality of algorithm performance in terms of metrics: MAE = 0.67; MSE = 1.78; RMSE = 1.33; MAPE = 0.52%. Three limitations of the model are unaccounted for fast-onset concrete creep, external deformation limitations, and cases of using slabs for transfer structures.

Keywords: heat release of concrete, crack formation in concrete slabs, guaranteed prediction of crack resistance, crack resistance criterion, selection of concrete composition in design

Acknowledgements. The authors would like to thank the editors and reviewers for their attentive attitude towards the article and the valuable recommendations for its improvement.

Funding Information. The study was supported by the grant of the Russian Science Foundation no. 25-19-00164, <https://rscf.ru/project/25-19-00164/>

For Citation. Kondratieva TN, Tyurina VS, Chepurmenko AS. Machine Learning Model for Determining the 28-day Limit of Concrete Heat Release in Massive Monolithic Foundation Slabs. *Advanced Engineering Research (Rostov-on-Don)*. 2026;26(2):2285. <https://doi.org/10.23947/2687-1653-2026-26-2-2285>

Введение. Трещиностойкость массивных монолитных железобетонных конструкций остается одним из наиболее важных вопросов современного строительства, от решения которого зависят долговечность и эксплуатационная надежность зданий и сооружений. Неравномерное температурное распределение, усадочные деформации в процессе твердения бетона являются основными факторами образования трещин в раннем возрасте бетона [1]. Для предупреждения дефектов необходима своевременная оценка рисков их образования, и эта проблема активно обсуждается в литературе. Так, предложенный в [2] алгоритм позволяет сопоставить характеристики бетона с изменением температурного поля в процессе твердения. Авторы [3] исследуют температурный градиент в массивной монолитной плите на основе полевых измерений и показывают, как разница между центром и поверхностью конструкции формирует внутренние растягивающие напряжения. В [4] с акцентом на методики конечноэлементного моделирования (КЭМ) анализируются градиенты температур между центральными и поверхностными зонами массивов. Результаты трехмерных расчетов позволяют сформулировать требования к механическим характеристикам бетона и температурному перепаду между центром и поверхностью конструкции при моделировании температурных напряжений в системе «центр — поверхность» [5]. В [6] рассматривается современный численный метод фазового поля, который позволяет моделировать процесс образования температурных трещин и динамику их развития в массивных бетонных конструкциях. Авторы данной работы вводят критерий сравнения расчетных напряжений и прочности бетона на растяжение.

В [7] рассматриваются методы расчета температурного поля с учетом изменений свойств бетона во времени и такие меры контроля, как теплоизоляция, модификация смеси, ограничения температурного режима бетона при укладке. Авторы [8] вводят критерии прочности при термонапряженном состоянии. В [9] по температурным напряжениям оценивается риск раннего трещинообразования.

Авторы перечисленных выше публикаций решают прямую задачу оценки риска раннего трещинообразования в массивных монолитных конструкциях на стадии возведения по таким параметрам, как геометрия конструкции, тепловыделение бетона, механические характеристики и параметры теплообмена. Перечисленные подходы, основанные на КЭМ, позволяют с высокой точностью оценить риск трещинообразования, однако требуют значительных вычислительных ресурсов, времени и детальной настройки модели. Это делает их непригодными для оперативного использования на этапе предварительного подбора состава бетонной смеси, когда необходимо быстро перебрать множество вариантов цемента и добавок.

Один из наиболее эффективных способов снижения риска раннего трещинообразования в массивных монолитных конструкциях — сокращение удельного тепловыделения на 1 м^3 бетонной смеси. Эта величина определяется содержанием цемента в 1 м^3 бетонной смеси и его минералогическим составом. Для предотвращения раннего трещинообразования в массивных конструкциях применяются цементы с низкой экзотермичностью, а также вводятся добавки, позволяющие снизить содержание цемента при сохранении прочности. Ряд зарубежных исследователей фокусируется именно на оптимизации составов бетонных смесей для массивных конструкций, уделяя особое внимание управлению тепловыделением при гидратации за счет использования таких вспомогательных цементирующих материалов (ВЦМ), как гранулированный доменный шлак (ГДШ), зола уноса (ЗУ), микрокремнезем и метакаолин [10].

Вспомогательные цементирующие материалы существенно влияют на тепловыделение, однако исследователи этих процессов дают лишь качественные или частично количественные рекомендации (например, «замена цемента на 30 % шлака снижает тепловыделение на 15–20 %»). На основе таких подходов сложно получить конкретное числовое значение предельно допустимого тепловыделения Q_{max} для заданных геометрических и климатических условий. Затруднение объясняется тем, что конечная допустимая величина зависит от сложного взаимодействия большого количества параметров (геометрия плиты, условия окружающей среды, кинетика тепловыделения, начальная температура смеси, класс бетона по прочности и др.).

В [11] рассматриваются подходы к подбору составов низкотермичных смесей с различными долями ГДШ и ЗУ. В [12] показано, как тепловыделение и кинетика твердения зависят от степени замещения цемента. В [13] изучено влияние указанных факторов на развитие температурных напряжений. Авторы статьи [14] предлагают обобщенный обзор влияния различных типов ВЦМ на теплоту гидратации. В [15] рассмотрено их воздействие на микроструктуру цементного камня. В [16] анализируется формирование прочности бетона на ранних сроках твердения при использовании ВЦМ.

Технические исследования, посвященные моделированию температурного поля и развитию напряжений в раннем возрасте, подробно рассматриваются в работе [17]. В [18] предложены численные методы оценки термомеханического поведения массивных бетонных конструкций. Исследование [19] развивает данный подход с учетом реальных параметров тепловыделения и состава смеси. Авторы [20] пишут о разработке устойчивых низкоуглеродных составов, включая современные системы типа LC3⁴, которые демонстрируют потенциал снижения углеродного следа и температуры гидратации при сохранении эксплуатационных характеристик.

В [21] представлены практические рекомендации по оптимизации пропорций компонентов, включая использование тройных смесей и низкоуглеродных вяжущих систем. В [22] предложены конкретные диапазоны замещения цемента, методики лабораторных испытаний, а также примеры рецептур, обеспечивающих оптимальный баланс между снижением тепловыделения и сохранением прочностных характеристик.

Несмотря на несомненные достоинства этих работ, они, как правило, ориентированы на конкретные материалы и условия, а их результаты не обобщены в виде компактной прогнозной модели, пригодной для инженерной практики. Таким образом, сохраняется разрыв между:

- задачей подбора состава (нужно быстро оценить, какое тепловыделение допустимо);
- существующими инструментами (трудоемкое КЭМ или экспериментальное приготовление смесей).

Итак, опубликованные исследования предлагают:

- прямое моделирование температурных напряжений при заданных характеристиках бетона (что требует много времени и специализированного программного обеспечения);
- рецептурное снижение тепловыделения без привязки к конкретному допустимому порогу, определяемому геометрией конструкции и условиями теплообмена.

Отсутствует инструмент, позволяющий на стадии подбора состава мгновенно получать ответ на вопрос: «Какое максимальное тепловыделение к 28-м суткам допустимо для фундаментной плиты с заданными параметрами, чтобы гарантировать трещиностойкость?». Настоящее исследование направлено на заполнение этого пробела. Цель работы — создание прогнозной модели для определения допустимого уровня тепловыделения, при котором обеспечивается трещиностойкость массивных монолитных фундаментных плит. Решение данной задачи имеет большое значение на стадии подбора состава бетонной смеси для бетонирования массивных монолитных конструкций. В качестве критерия трещиностойкости принимается максимальный уровень напряжений (отношение максимального растягивающего напряжения к прочности на растяжение). Он не должен превышать единицу.

Для достижения поставленной цели последовательно решены две группы задач. Первая — разработка исходной физико-механической расчетной модели. Ниже представлены три ее составляющие:

- выбрана одномерная конечноэлементная постановка задачи теплопроводности с учетом послойного бетонирования;
- заданы зависимости теплофизических и механических свойств бетона от времени и температуры (функция тепловыделения, кинетика твердения, прочность, мгновенный модуль упругой деформации);
- реализован алгоритм поиска предельно допустимого тепловыделения Q_{\max} методом бисекции по критерию уровня растягивающих напряжений меньше единицы.

Вторая группа задач — построение и проверка модели машинного обучения. У нее четыре составляющие:

- сформирован датасет из 9375 образцов путем параметрического конечноэлементного моделирования;
- выбран и обучен алгоритм CatBoost с оптимизацией гиперпараметров;
- выполнена оценка точности на обучающей и тестовой выборках;
- проведена Sharp-интерпретация модели.

Материалы и методы. В качестве входных выбрали следующие физико-технические и технологические параметры:

- толщина фундаментной плиты, h , м;
- коэффициент теплоотдачи на верхней поверхности, α , Вт/(м²·°С);
- температура окружающей среды, T_{amb} , °С;
- начальная температура бетонной смеси, T_0 , °С;
- класс бетона по прочности на сжатие, В, МПа (ГОСТ 18105-2018⁵);
- темп твердения (rate), который может принимать три значения (1 — быстро твердеющий, 2 — нормально твердеющий и 3 — медленно твердеющий).

⁴ От англ. Limestone Calcined Clay Cement — обожженный известняковый глиняный цемент.

⁵ ГОСТ 18105-2018 *Бетоны. Правила контроля и оценки прочности*. Гарант. URL: <https://base.garant.ru/72932108/> (дата обращения: 02.03.2026).

Выходная переменная — максимально допустимое суммарное тепловыделение бетона за время активной гидратации цемента в течение 28 суток (Q_{max} , МДж/м³). Объем датасета — 9375 экземпляров, полученных в результате численного моделирования и параметрического анализа.

При формировании обучающего датасета толщина фундаментной плиты варьировалась от 1 до 2 м с шагом 0,25 м. Коэффициент теплоотдачи — от 3 до 23 Вт/(м²·°C) с шагом 5 Вт/(м²·°C). Температура окружающей среды — от 5 до 35 °C с шагом 7,5 °C. Классы бетона — В25, В30, В35, В40, В45. Функция тепловыделения определялась уравнением [23]:

$$Q(t) = Q_{28} \exp \left(k \left(1 - \left(\frac{28}{t-b} \right)^x \right) \right), \quad (1)$$

где Q_{28} — тепловыделение в МДж/м³ к 28-м суткам; t — время в сутках; k и x — параметры, определяющие скорость тепловыделения; $b = 4$ ч — индукционный период.

Расчет термонапряженного состояния выполняли в упрощенной постановке по методике, приведенной в [24]. Ранее ее неоднократно апробировали на экспериментальных данных [25].

Для расчета температурного поля использовали одномерное уравнение теплопереноса:

$$\lambda \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + W = \rho c \frac{\partial T}{\partial t}, \quad (2)$$

где λ — коэффициент теплопроводности; T — температура; $W = \frac{\partial Q}{\partial t}$ — плотность внутренних источников тепловыделения; ρ — плотность; c — удельная теплоемкость; t — время.

При расчете температурных полей учитывалось взаимодействие плиты с грунтовым массивом, толщина которого принималась постоянной и равной 3 м. Теплофизические характеристики бетона: $\rho = 2400$ кг/м³, $c = 1000$ Дж/(кг·°C), $\lambda = 2,67$ Вт/(м·°C). Теплофизические характеристики грунта: $\rho_g = 1800$ кг/м³, $c_g = 750$ Дж/(кг·°C), $\lambda_g = 0,9$ Вт/(м·°C).

На поверхности плиты принимались граничные условия конвективного теплообмена:

$$\lambda \frac{\partial T}{\partial z} + \alpha (T - T_{amb}) = 0, \quad (3)$$

где α — коэффициент теплоотдачи; T_{amb} — температура окружающей среды.

Температуру на нижней стороне грунтового массива для упрощения приняли равной постоянному значению T_{amb} :

$$T_g(t) = T_{amb}. \quad (4)$$

Начальная температура всего грунтового массива также принималась равной T_{amb} , а для бетона — начальной температуре бетонной смеси T_0 .

Уравнение (2) с граничными условиями (3) и (4) решалось методом конечных элементов. Для этого вводилась сетка по z и t (40 конечных элементов по толщине плиты, 40 конечных элементов по толщине грунтового массива, 3000 шагов по времени на интервале 28 суток). При расчете температурных полей и напряжений учитывались продолжительность и послойность возведения конструкции. Толщина слоев принималась равной 0,25 м, продолжительность укладки слоя — 2 часа. До «рождения» слоя ему присваивались:

- аномально высокое значение теплопроводности — $\lambda = 1000$ Вт/(м·°C);
- нулевая теплоемкость, что физически эквивалентно отсутствию слоя.

После «рождения» слою присваивались его фактические характеристики.

До окончания и в течение 12 часов после завершения укладки бетонной смеси считалось, что поверхность фундаментной плиты открыта, происходит свободный теплообмен с окружающей средой и коэффициент теплоотдачи равен 23 Вт/(м²·°C). Через 12 часов после завершения укладки коэффициент теплоотдачи принимался равным входной переменной модели α . Расчеты проводили в разработанной авторами программе в среде Matlab.

При расчете напряженно-деформированного состояния прочностные характеристики бетона представлялись функциями от его эквивалентного возраста t_{eq} , определяемого по формуле [26]:

$$t_{eq} = \frac{DM}{20}. \quad (5)$$

Здесь DM — степень зрелости бетона, определяемая интегралом:

$$DM = \int_0^t T(\tau) d\tau, \quad (6)$$

где t — текущий момент времени, τ — переменная интегрирования, $T(\tau)$ — температура в момент времени τ .

Прочность бетона при сжатии R определялась по формуле [25]:

$$R = R_{28} \exp \left(s \left(1 - \sqrt{\frac{28}{t_{eq} - b}} \right) \right), \quad (7)$$

где $R_{28} = B + 12$ — значение прочности при сжатии в возрасте 28 суток; t_{eq} — эквивалентный возраст в сутках; $b = 0,167$ сут = 4 ч — индукционный период; s — коэффициент, зависящий от кинетики тепловыделения.

Принимались три темпа твердения бетона: быстрый, нормальный и медленный. В таблице 1 представлены значения коэффициентов k и x в формуле (1), а также коэффициента s в формуле (7) для трех темпов твердения.

Таблица 1

Параметры скорости и кинетики тепловыделения в зависимости от темпа твердения

Темп твердения	k	x	s
Быстрый (1)	0,14	0,40	0,20
Нормальный (2)	0,19	0,51	0,35
Медленный (3)	0,24	0,62	0,50

Мгновенный модуль упругой деформации бетона E и его прочность при растяжении R_t определялись через прочность при сжатии по формулам [25]:

$$E = 22265 \cdot \left(\frac{R}{10} \right)^{0,28}, \quad (8)$$

$$R_t = 0,29R^{0,6}. \quad (9)$$

Формула (8) использовалась для вычисления модуля упругости при эквивалентном возрасте бетона не менее 12 ч. При эквивалентном возрасте меньше 12 ч величина E принималась равной нулю (считалось, что бетон до возраста 12 ч еще не является твердым телом и температурные напряжения в нем отсутствуют).

Приращения напряжений $\Delta\sigma_x = \Delta\sigma_y = \Delta\sigma$ на каждом шаге по времени во всех узлах сетки вычислялись по формуле [24]:

$$\Delta\sigma = \frac{E(z,t)}{1-\nu} (\Delta\varepsilon - \alpha_T \Delta T). \quad (10)$$

Здесь $\nu = 0,2$ — коэффициент Пуассона бетона; $\alpha_T = 10^{-5}$ 1/°C — коэффициент линейного температурного расширения; ΔT — изменение температуры в расчетном узле за время ΔT ; $\Delta\varepsilon$ — приращение полной деформации, определяемое по формуле:

$$\Delta\varepsilon = \frac{\alpha_T \int_{-\frac{h}{2}}^{\frac{h}{2}} E(z,t) \Delta T(z) dz}{\int_{-\frac{h}{2}}^{\frac{h}{2}} E(z,t) dz}. \quad (11)$$

Для каждого набора данных [$h \propto T_{amb} B rate$] предельно допустимую величину тепловыделения $Q_{max} = Q_{28}$ определяли при различных начальных температурах бетонной смеси — от 5 °C до T_{amb} . Значение 5 °C соответствует минимальной температуре бетонной смеси к началу выдерживания согласно СП 70.13330.2012⁶. Этот же нормативный документ устанавливает максимальную температуру бетонной смеси. Она не должна превышать 30 °C при бетонировании конструкций с модулем поверхности более 3. Предел для массивных конструкций с модулем поверхности менее 3 — 25 °C. Однако на практике редко соблюдается требование по максимальной температуре, поэтому в обучающем датасете максимальное значение T_0 составляло 35 °C при такой же температуре окружающей среды. Задание T_0 выше T_{amb} (например, 35 °C при $T_{amb} = 5$ °C) было бы физически необоснованным и противоречило бы требованиям нормативов. Случай зимнего бетонирования с предварительным подогревом бетонной смеси мы здесь не рассматриваем, что видно из минимальной учитываемой температуры окружающей среды (5 °C).

Методом бисекции определяли $Q_{max} = f(h, \alpha, T_{amb}, T_0, B, rate)$ при заданных значениях входных переменных из обучающего набора. Искали такое значение Q_{28} в диапазоне от 20 до 520 МДж/м³, при котором максимальный уровень растягивающих напряжений σ/R_t равен единице. Допустимая погрешность при поиске величины Q_{max} методом бисекции принималась равной 1 %.

⁶ СП 70.13330.2012. Несущие и ограждающие конструкции. Москва: ФЦС, 2013.

Диапазон от 20 до 520 МДж/м³ выбрали из следующих соображений. По данным [27], удельное тепловыделение портландцемента в возрасте 28 суток может принимать значения от 120 до 513 кДж/кг. Содержание цемента в бетоне может варьироваться от 200 до 600 кг/м³ (СНиП 5.01.23-83⁷). В итоге для нижней границы Q_{28} получили $120 \text{ кДж/кг} \cdot 200 \text{ кг/м}^3 = 24 \text{ МДж/м}^3$. Данное значение округлили до 20 МДж/м³. Для верхней границы получили: $513 \text{ кДж/кг} \cdot 600 \text{ кг/м}^3 = 308 \text{ МДж/м}^3$. Однако есть некоторые цементы, например, напрягающие, у которых тепловыделение выше, чем у портландцемента. Разница доходит до двукратной. Поэтому верхнюю границу скорректировали в сторону увеличения.

В таблице 2 частично представлен полученный массив данных для обучения модели искусственного интеллекта.

Таблица 2

Исходные данные для обучения модели

№	h , м	α , Вт/(м ² ·°C)	T_{amb} , °C	T_0 , °C	B , МПа	$rate$	Q_{max} , МДж/м ³
1	1	3	5	5	25	1	302,2265625
2	1	3	5	5	25	2	325,6640625
3	1	3	5	5	25	3	298,3203125
4	1	3	5	5	30	1	310,0390625
5	1	3	5	5	30	2	335,4296875
6	1	3	5	5	30	3	310,0390625
7	1	3	5	5	35	1	317,8515625
8	1	3	5	5	35	2	343,2421875
9	1	3	5	5	35	3	321,7578125
10	1	3	5	5	40	1	323,7109375
11	1	3	5	5	40	2	351,0546875
12	1	3	5	5	40	3	333,4765625
13	1	3	5	5	45	1	327,6171875
...
2341	1,25	8	12,5	5	45	3	136,6992188
2342	1,25	8	12,5	6,875	25	1	168,9257813
2343	1,25	8	12,5	6,875	25	2	167,9492188
2344	1,25	8	12,5	6,875	25	3	120,0976563
2345	1,25	8	12,5	6,875	30	1	177,7148438
2346	1,25	8	12,5	6,875	30	2	175,7617188
2347	1,25	8	12,5	6,875	30	3	125,9570313
2348	1,25	8	12,5	6,875	35	1	185,5273438
2349	1,25	8	12,5	6,875	35	2	183,5742188
...
9366	2	23	35	35	30	3	64,67773438
9367	2	23	35	35	35	1	62,72460938
9368	2	23	35	35	35	2	78,34960938
9369	2	23	35	35	35	3	66,63085938
9370	2	23	35	35	40	1	64,67773438
9371	2	23	35	35	40	2	81,27929688
9372	2	23	35	35	40	3	69,07226563
9373	2	23	35	35	45	1	66,63085938
9374	2	23	35	35	45	2	83,72070313
9375	2	23	35	35	45	3	71,02539063

Как видим, сформированный массив данных представляет собой шесть входных признаков и одну целевую переменную. Для построения и валидации модели весь набор данных разделили на обучающую и тестовую выборки. Процедура формирования соотношений имела вид 80/20, при этом проводилась многократная перекрестная проверка по системе Repeated k-Fold Cross-Validation⁸ ($k = 5$) с фиксированным начальным параметром генератора случайных чисел ($random_state^9 = 42$).

⁷ СНиП 5.01.23-83. Типовые нормы расхода цемента для приготовления бетонов сборных и монолитных бетонных, железобетонных изделий и конструкций. Москва: Стройиздат, 1985.

⁸ Многократная k-блочная кросс-валидация (англ.).

⁹ Начальное состояние (англ., подразумевается состояние генератора случайных чисел).

Перед разбиением проверили корректность значений и согласованность размерностей переменных. Признак «rate» перевели в категорию порядковых переменных согласно таблице 1. Итого, при общем объеме выборки 9375 наблюдений количественная составляющая обучающей выборки: 7500 записей для обучения модели и 1875 записей для ее валидации. Данные тестовой выборки использовались один раз только для оценки обобщающей способности модели.

Статистические характеристики исходного набора данных обобщаются в таблице 3. Здесь также представлены диапазоны изменения входных и выходного параметров. Основные показатели: размер выборки, среднее выборочное, рассеяние, экстремумы значений переменных. Совокупность данных показателей помогает провести статистический анализ переменных, определить их разброс относительно центра, показать асимметричность распределения, вывести законы распределения данных вариационных рядов.

Таблица 3

Статистические характеристики исходного набора данных

Параметр	h , м	α , Вт/(м ² ·°C)	T_{amb} , °C	T_0 , °C	B , МПа	$rate$	Q_{max} , МДж/м ³
Среднее	1,50	13,00	20,00	12,50	35,00	2,00	129,00
Стандартное отклонение	0,35	7,07	10,61	8,39	7,07	0,82	51,36
Min	1,00	3,00	5,00	5,00	25,00	1,00	38,68
25 %	1,25	8,00	12,50	5,00	30,00	1,00	92,51
50 %	1,50	13,00	20,00	10,62	35,00	2,00	116,19
75 %	1,75	18,00	27,50	16,25	40,00	3,00	154,28
Max	2,00	23,00	35,00	35,00	45,00	3,00	358,87

Машинное обучение по сути представляет собой многомерную интерполяцию, поэтому надежную работу модели можно гарантировать только в пределах изменения входных параметров в обучающем наборе данных. Указанные в таблице 3 минимальные и максимальные значения входных параметров перекрывают диапазон наиболее часто встречающихся характеристик массивных монолитных фундаментных плит.

Для улучшения качества моделей проанализировали корреляционные связи между переменными. Для анализа данных и построения модели прогнозирования максимально допустимого тепловыделения бетона при возведении массивных монолитных фундаментных плит применялись алгоритмы машинного обучения Gradient Boosting и CatBoostRegressor¹⁰ с использованием библиотеки градиентного бустинга CatBoost. Для оптимизации гиперпараметров модели задействовали методы случайного поиска (Random Search) и байесовской оптимизации (Bayesian Optimization).

Значения параметров модели градиентного бустинга для регрессии (CatBoostRegressor):

- iterations (число итераций) — 600–2000;
- depth (глубина) — 4–12;
- learning_rate (скорость обучения) — 0,01–0,09;
- L2 reg_lambda (коэффициент переменной регуляризации L2 функции потерь) — 0,001–0,009.

Качество прогнозирования оценивали по метрикам MAE (средняя абсолютная ошибка), MSE (среднеквадратичная ошибка), MAPE (средняя абсолютная процентная ошибка), RMSE (корень из среднеквадратичной ошибки) и коэффициенту детерминации R^2 .

Для интерпретации воздействия рассматриваемых параметров на прогнозное значение модели использовался визуальный метод влияния признаков (Shap summary plot), основанный на теории Шепли. Метод позволяет оценить не только важность вклада каждого параметра в итоговое предсказание модели, но и определяет направление его влияния. При построении Shap summary plot использовались ключевые свойства: локальная точность, линейность, симметрия, отсутствие эффекта пропущенного признака (вклад пропущенного признака равен нулю). Данный подход показывает, насколько сильно меняются результаты предсказания при изменении значений конкретного параметра.

Результаты исследования. На рис. 1 показана корреляция входных и выходного параметров модели. За исключением начальной температуры бетонной смеси и температуры окружающей среды, корреляция между остальными входными параметрами отсутствует, что говорит об их независимости.

¹⁰ Сокращение обозначает использование категориального повышения в решении регрессионных задач (англ.).

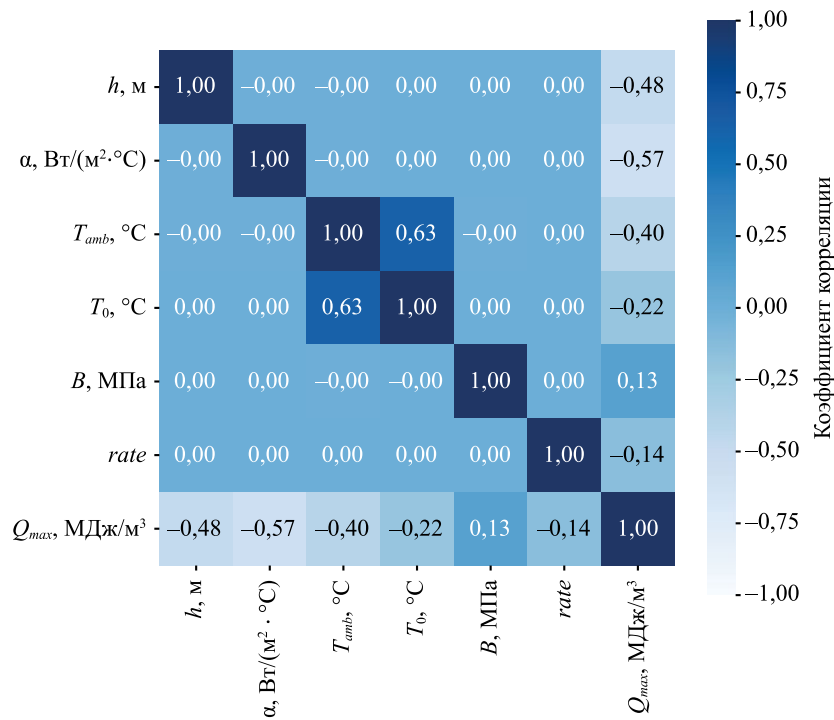


Рис. 1. Корреляционная матрица

Параметр начальной температуры бетонной смеси имеет значимую корреляцию с температурой окружающей среды ($\rho = 0,63$). Наблюдается слабая и умеренная корреляционная связь между максимальным тепловыделением бетона и входными параметрами модели:

- толщина фундаментной плиты ($\rho_{h/Q_{max}} = 0,48$);
- коэффициент теплоотдачи на верхней поверхности ($\rho_{\alpha/Q_{max}} = 0,57$).

Количественная значимость параметров модели по степени важности наглядно представлена на рис. 2:

- коэффициент теплоотдачи на поверхности — 96 %;
- толщина фундаментной плиты — 75 %;
- температура окружающей среды — 61 %;
- темп твердения — 35 %;
- класс бетона — 17 %;
- начальная температура бетонной смеси — 14 %.

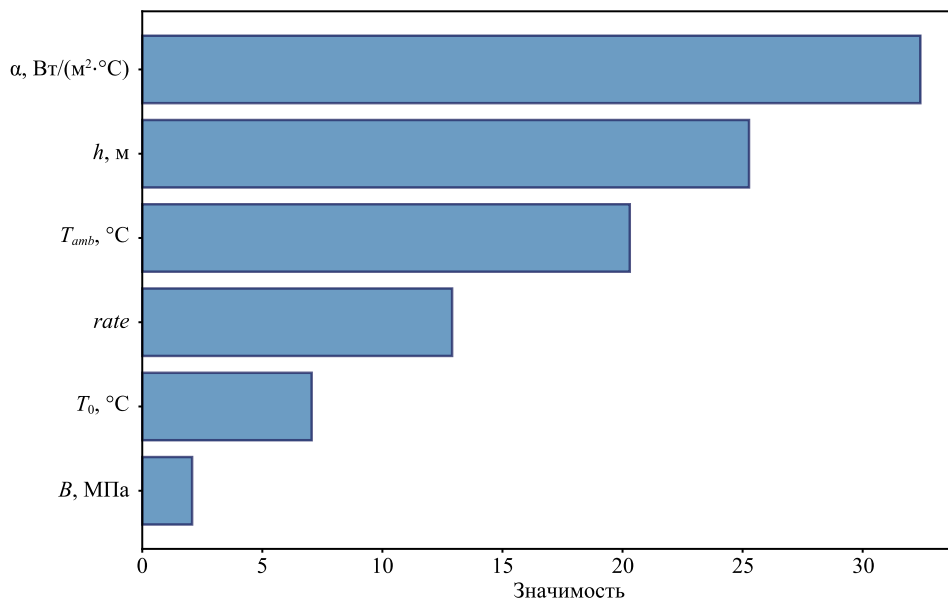


Рис. 2. Среднее абсолютное влияние признаков на выходную переменную

Оптимальные значения параметров, полученные в процессе обучения моделей, представлены в таблице 4.

Таблица 4

Оптимальные значения параметров модели

Модель	Параметр	Значение
CatBoost	Iterations (число итераций)	1488
	Depth (глубина обучения)	8
	Learning rate (скорость обучения)	0,06
	L2 leaf reg (L2-регуляризация для предотвращения переобучения)	0,006

Метрики качества работы алгоритма приведены в таблице 5.

Таблица 5

Метрики качества модели

Метрика/Модель	Значение
MAE	0,67
MSE	1,53
RMSE	1,33
MAPE, %	0,52
R^2_{train} (обучающая)	0,99
R^2_{test} (тестовая)	0,98

Визуализация предсказаний для обучающей и тестовой выборки представлена на рис. 3 и 4 соответственно. По оси абсцисс отложены целевые значения T выходного параметра, а по оси ординат — прогнозируемые значения P . Все точки расположены очень близко к прямой $P = T$, что говорит об очень высоком качестве прогнозирования.

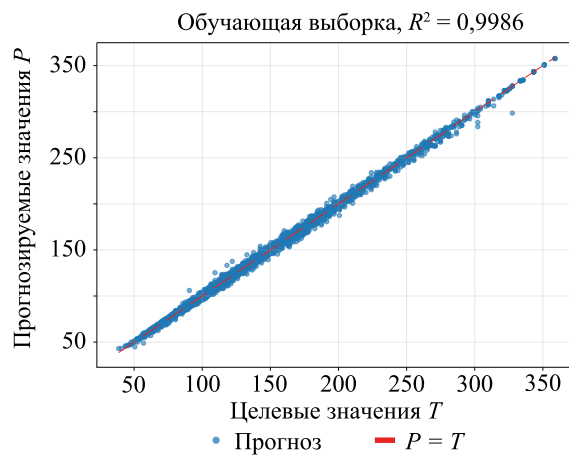


Рис. 3. График ошибок прогноза для обучающей выборки

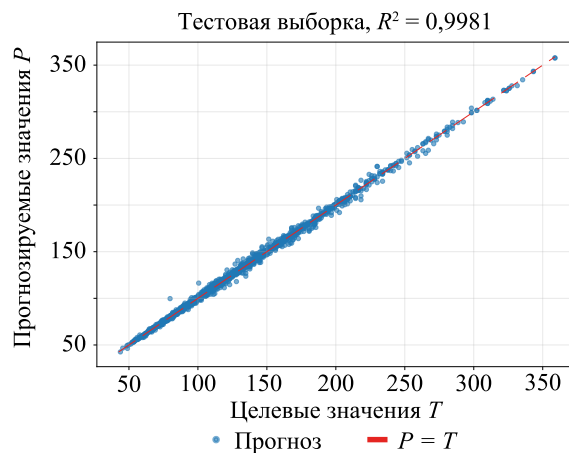


Рис. 4. График ошибок прогноза для тестовой выборки

Обсуждение. Значимая корреляция температуры окружающей среды с начальной температурой бетонной смеси ($\rho = 0,63$) объясняется тем, что верхняя граница начальной температуры бетонной смеси при формировании обучающего набора данных ограничивалась температурой окружающей среды. Присутствие слабой или умеренной корреляции между входными параметрами и максимальным тепловыделением бетона говорит о сложном взаимодействии между отдельными параметрами модели. Влияние параметров на Q_{max} может быть нелинейным или взаимозависимым. Так, например, толщина плиты взаимодействует с коэффициентом теплоотдачи на поверхности. При большой толщине плиты теплопередача с поверхности затруднена и приводит к накоплению тепла внутри конструкции. Однако при повышенном коэффициенте теплоотдачи тепло быстрее отводится, снижая риск перегрева.

Все входные параметры, за исключением класса бетона, показывают отрицательную корреляционную связь с выходным параметром Q_{max} . Это соответствует физике процесса.

Снижение температуры окружающей среды и начальной температуры бетонной смеси при неизменном тепловыделении приводит к снижению максимального уровня напряжений. Довольно известный прием — добавление в бетонную смесь льда при производстве работ в жарком климате [28]. Все более популярным методом охлаждения становится прямая подача жидкого азота в емкости бетоновозов [29]. Как следствие, при неизменном уровне напряжений снижение значений T_{amb} и T_0 приведет к увеличению допустимого значения Q_{max} .

Слабая положительная связь между классом бетона и максимально допустимым тепловыделением объясняется тем, что при использовании бетонов высоких классов вместе с прочностью на сжатие возрастает прочность на растяжение, и это позволяет конструкциям выдерживать большие температурные градиенты.

Для лучшей интерпретации результатов прогнозирования рассматривался также альтернативный вариант анализа признаков модели — Sharp summary plot. Этот метод наглядно показывает одновременно важность признаков, направление их влияния и распределение вкладов на значения целевой переменной (рис. 5).

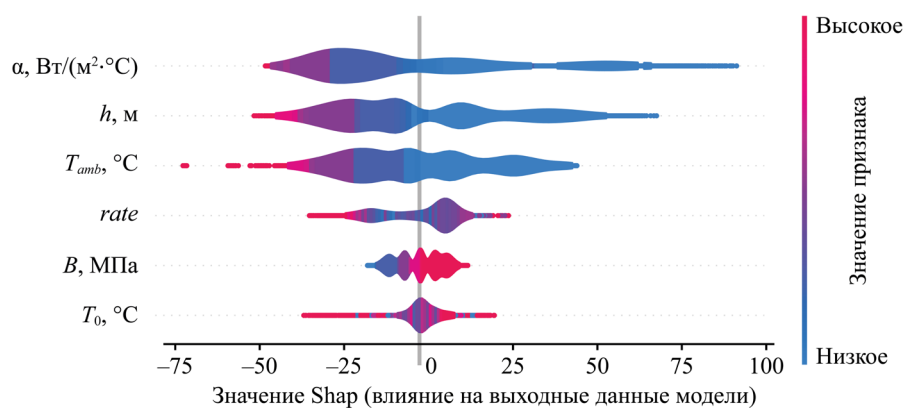


Рис. 5. Оценка важности признаков модели

Анализ Sharp-графика показал, что наибольшее влияние на максимально допустимое суммарное тепловыделение оказывают толщина плиты и коэффициент теплоотдачи, определяющие интенсивность теплоотвода и распределение температурного поля между центральной и поверхностной зонами. При увеличении толщины конструкции массивных монолитных плит повышается тепловой градиент и растет напряжение в поверхностных слоях, что приводит к снижению допустимого тепловыделения. Меньшую значимость демонстрирует параметр температуры окружающей среды. Имеет особое значение его связь с темпом твердения бетона:

- ускоренное твердение при высокой температуре окружающей среды снижает максимально допустимое тепловыделение бетона;
- медленное твердение при пониженной температуре окружающей среды увеличивает максимально допустимое тепловыделение бетона.

В целом тенденция влияния признаков, определенная по анализу Sharp-значений, совпадает с результатами корреляционного анализа.

Заключение. Отсутствие сильной корреляционной зависимости между большинством входных параметров тестируемой модели прогнозирования максимально допустимого тепловыделения бетона при возведении массивных монолитных фундаментных плит свидетельствует о том, что каждый из этих факторов вносит независимый вклад в формирование температурных напряжений на стадии возведения конструкции. Это говорит о сложном, нелинейном взаимодействии переменных, при котором риск раннего трещинообразования в массивных монолитных конструкциях определяется не одним доминирующим параметром, а их совокупным влиянием.

Оптимизация гиперпараметров с использованием методов байесовского поиска обеспечила высокое качество работы алгоритма по метрикам: MAE = 0,67; MSE = 1,78; RMSE = 1,33; MAPE = 0,52 %.

Shar-анализ результатов расчета термонапряженного состояния конструкций с учетом временной и температурной зависимости прочностных характеристик бетона позволил определить вклад входных параметров в результирующие прогнозы. Наиболее существенные — толщина фундаментной плиты и коэффициент теплоотдачи на поверхности. От них в наибольшей степени зависит, достигнет ли тепловыделение допустимого максимума.

Разработан комплексный подход к прогнозированию максимально допустимого тепловыделения бетона при возведении массивных монолитных фундаментных плит, основанный на сочетании конечноэлементного моделирования и методов машинного обучения.

Предлагаемую модель машинного обучения можно использовать на стадии предварительного подбора состава бетонной смеси для ориентировочной оценки максимально допустимого расхода цемента. Однако для широкого внедрения в проектную практику нужна дополнительная валидация на экспериментальных данных.

Необходимо также отметить ограничения предлагаемой модели.

1. При обучении модели определение уровня напряжений выполнялось без учета быстроснатекающей ползучести бетона. Истинный уровень напряжений при учете ползучести будет ниже расчетного, поэтому разработанная модель предсказывает допустимый уровень тепловыделения с некоторым запасом. Дальнейшие исследования могут быть направлены на учет ползучести при построении прогнозных моделей.

2. Разработанная модель применима для конструкций, в которых температурные напряжения вызваны только так называемым внутренним ограничением деформации (поперечные сечения остаются плоскими при неодинаковых температурных деформациях по высоте сечения). Помимо внутренних ограничений конструкция может испытывать внешние ограничения деформации, когда, например, плита возводится на основании из скального грунта и имеет с ним жесткую связь, ограничивающую полные деформации. Для конструкций, испытывающих внешние ограничения деформаций, предлагаемая модель неприменима. В таких конструкциях оценить риск раннего трещинообразования можно только путем полноценного трехмерного конечноэлементного анализа.

3. Массивные плиты помимо фундаментов используются в качестве трансферных конструкций, обеспечивающих взаимодействие несоосных колонн надземной и подземной частей здания. Для данного случая граничные условия отличаются (вместо взаимодействия с грунтовым массивом на нижней поверхности имеет место теплообмен с окружающей средой). Построение прогнозных моделей для таких конструкций можно также отметить в качестве перспективы дальнейших исследований.

Список литературы / References

1. Пузатова А.В., Дмитриева М.А., Товпинец А.О., Лейцин В.Н. Исследование процессов эволюции дефектов структуры мелкозернистых бетонов методами компьютерной томографии. *Advanced Engineering Research (Rostov-on-Don)*. 2024;24(3):227–237. <https://doi.org/10.23947/2687-1653-2024-24-3-227-237>

Puzatova AV, Dmitrieva MA, Tovpinets AO, Leitsin VN. Study of Structural Defects Evolution in Fine-Grained Concrete Using Computed Tomography Methods. *Advanced Engineering Research (Rostov-on-Don)*. 2024;24(3):227–237. <https://doi.org/10.23947/2687-1653-2024-24-3-227-237>

2. Klemczak B, Smolana A. Multi-Step Procedure for Predicting Early-Age Thermal Cracking Risk in Mass Concrete Structures. *Materials*. 2024;17(15):3700. <https://doi.org/10.3390/ma17153700>

3. Smolana A, Klemczak B, Azenha M, Schlicke D. Early Age Cracking Risk in a Massive Concrete Foundation Slab: Comparison of Analytical and Numerical Prediction Models with On-site Measurements. *Construction and Building Materials*. 2021;301:124135. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.124135>

4. Tyurina V, Chepurnenko A, Akopyan V. Prediction of Thermal Cracking during Construction of Massive Monolithic Structures. *Applied Sciences*. 2025;15(3):1499. <https://doi.org/10.3390/app15031499>

5. Tzu-Han Wen, Terry TYP Yuen, Victor KS Li, Albert T Yeung. A Case Study on Early-Age Cracking of High-Strength Concrete Construction by Coupled Thermal-Mechanical Analysis and Field Monitoring. *Case Studies in Construction Materials*. 2024;21:e03436. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2024.e03436>

6. Ghasabeh M, Göktepe S. Phase-Field Modeling of Thermal Cracking in Hardening Mass Concrete. *Engineering Fracture Mechanics*. 2023;289:109398. <https://doi.org/10.1016/j.engfracmech.2023.109398>

7. Zhiwei Qu, Yingda Zhang, Zihao Liu, Ruizhe Si, Jie Wu. A Review on Early-Age Cracking of concrete: Causes and control. *Case Studies in Construction Materials*. 2024;21:e03848. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2024.e03848>

8. Golewski GL. The Phenomenon of Cracking in Cement Concretes and Reinforced Concrete Structures: The Mechanism of Cracks Formation, Causes of Their Initiation, Types and Places of Occurrence, and Methods of Detection — A Review. *Buildings*. 2023;13(3):765. <https://doi.org/10.3390/buildings13030765>

9. Klemczak B, Żmij A. Insight into Thermal Stress Distribution and Required Reinforcement Reducing Early-Age Cracking in Mass Foundation Slabs. *Materials*. 2021;14(3):477. <https://doi.org/10.3390/ma14030477>

10. Raghav M, Park T, Hyun-Min Yang, Seung-Yeop Lee, Karthick S, Han-Seung Lee. Review of the Effects of Additive Cementitious Materials and Chemical Additives on the Physical, Mechanical and Durability Properties of Hydraulic Concrete. *Materials*. 2021;14(23):7270. <https://doi.org/10.3390/ma14237270>
11. Ozyildirim HC, Sharifi M, Hossain MS. Mass Concrete Mixtures Optimized for Temperature Control and High Workability. *Transportation Research Record*. 2023;2677(6):827–836. <https://doi.org/10.1177/03611981221150400>
12. Saeed MK, Rahman MK, Baluch MH. Early Age Thermal Cracking of Mass Concrete Blocks with Portland Cement and Ground Granulated Blast-Furnace Slag. *Magazine of Concrete Research*. 2016;68(13):647–663. <https://doi.org/10.1680/jmacr.15.00044>
13. Yaseen N, Alcivar-Bastidas S, Irfan-ul-Hassan M, Petroche DM, Qazi AU, Ramirez AD. Concrete Incorporating Supplementary Cementitious Materials: Temporal Evolution of Compressive Strength and Environmental Life Cycle Assessment. *Heliyon*. 2024;10(3):e25056. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e25056>
14. Ahmed A. Assessing the Effects of Additive Cementitious Materials on Concrete Properties: A Review. *Discover Civil Engineering*. 2024;1(1):145. <https://doi.org/10.1007/s44290-024-00154-z>
15. Hoon Moon, Ramanathan S, Suraneni P, Chang-Seon Shon, Chang-Joon Lee, Chul-Woo Chung. Revisiting the Effect of Slag in Reducing Heat of Hydration in Concrete in Comparison to Other Supplementary Cementitious Materials. *Materials*. 2018;11(10):1847. <https://doi.org/10.3390/ma11101847>
16. Yingda Zhang, Xinyue Liu, Ziyi Xu, Weiguang Yuan, Yong Xu, Zuobang Yao, et al. Early-age cracking of fly ash and GGBFS concrete due to shrinkage, creep, and thermal effects: a review. *Materials*. 2024;17(10):2288. <https://doi.org/10.3390/ma17102288>
17. Mardmomen S, Hung Liang (Roger) Chen. Modeling the thermal and mechanical properties of early age concrete containing ground granulated blast furnace slag. *Construction and Building Materials*. 2023;401:132902. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.132902>
18. Tahsin Alper Yikici, Hayri Sezer, Hung Liang (Roger) Chen. Modeling Thermal Behavior of Mass Concrete Structures at Early Age. *Transportation Research Record*. 2022;2676(6):536–548. <https://doi.org/10.1177/03611981221075626>
19. Elmahdy H, Tahwia AM, Elmasoudi I, Youssf O. Mechanical and Thermal Properties of Sustainable Low-Heat High-Performance Concrete. *Sustainability*. 2023;15(23):16139. <https://doi.org/10.3390/su152316139>
20. Haoyu Zeng, Ming Jin, Wenwei Li, Chang Gao, Yuefeng Ma, Qingfeng Guan, et al. Performance evolution of low heat cement under thermal cycling fatigue: A comparative study with moderate heat cement and ordinary Portland cement. *Construction and Building Materials*. 2024;412:134863. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.134863>
21. Mokal MP, Mandal R, Nayak S, Panda SK. Efficacy of High-Volume Fly Ash and Slag on the Physicomechanical, Durability, and Analytical Characteristics of High-Strength Mass Concrete. *Journal of Building Engineering*. 2023;76:107295. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2023.107295>
22. Lallas ZN, Gombeda MJ, Mendonca F. Review of Supplementary Cementitious Materials with Implications for Age-Dependent Concrete Properties Affecting Precast Concrete. *PCI Journal*. 2023;68(6):46–64. <https://doi.org/10.15554/pcij68.6-01>
23. Nesvetaev GV, Koryanova YI, Yazyev BM. Autogenous Shrinkage and Early Cracking of Massive Foundation Slabs. *Magazine of Civil Engineering*. 2024;17(6):13005. <https://doi.org/10.34910/MCE.130.5>
24. Chepurnenko A, Nesvetaev G, Koryanova Yu, Yazyev B. Simplified Model for Determining the Stress-Strain State in Massive Monolithic Foundation Slabs during Construction. *International Journal for Computational Civil and Structural Engineering*. 2022;18(3):126–136. <https://doi.org/10.22337/2587-9618-2022-18-3-126-136>
25. Chepurnenko AS, Nesvetaev GV, Koryanova YuI, Shut VV, Tyurina VS. Experience of Concreting a Massive Monolithic Foundation Slab. *Construction Materials and Products*. 2025;8(5):1–15. <https://doi.org/10.58224/2618-7183-2025-8-5-2>
26. Nesvetaev G. V., Koryanova Yu.I., Shut V. V. Specific heat dissipation of concrete and the risk of early cracking of massive reinforced concrete foundation slabs. *Construction Materials and Products*. 2024;7(3):1–13. <https://doi.org/10.58224/2618-7183-2024-7-4-3>
27. Nesvetaev GV, Koryanova YuI, Khezhev TA. Heat Dissipation of Cement and Design the Composition of Concrete for Massive Structures. *Construction Materials and Products* 2025;8(1):1–11. <https://doi.org/10.58224/2618-7183-2025-8-1-3>
28. Sanling Zhang, Peng Liu, Lei Liu, Jingxiang Huang, Xiang Cheng, Ying Chen, et al. Heat of Hydration Analysis and Temperature Field Distribution Study for Super-Long Mass Concrete. *Coatings*. 2024;14(3):369. <https://doi.org/10.3390/coatings14030369>
29. Kattoof I, Hassan MS, Hasan SS. Effects of Liquid Nitrogen Cooling on the Microstructure Properties of Nano-Modified Concrete under Hot Conditions. *Arabian Journal for Science and Engineering*. 2022;47(10):12569–12583. <https://doi.org/10.1007/s13369-021-06496-5>

Об авторах:

Татьяна Николаевна Кондратьева, кандидат технических наук, доцент кафедры «Математика и информатика» Донского государственного технического университета (344003, Российская Федерация, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), [SPIN-код](#), [ORCID](#), [ScopusID](#), [ResearcherID](#), [ResearchGate](#), ktn618@yandex.ru

Василина Сергеевна Тюрина, кандидат технических наук, доцент кафедры «Строительная механика и теория сооружений» Донского государственного технического университета (344003, Российская Федерация, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), [SPIN-код](#), [ORCID](#), [ScopusID](#), [ResearchGate](#), vasilina.93@mail.ru

Антон Сергеевич Чепурненко, доктор технических наук, профессор кафедры «Строительная механика и теория сооружений» Донского государственного технического университета (344003, Российская Федерация, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), [SPIN-код](#), [ORCID](#), [ScopusID](#), [ResearcherID](#), [ResearchGate](#), anton_chepurnenk@mail.ru

Заявленный вклад авторов:

Т.Н. Кондратьева: проведение исследования, курирование данных, формальный анализ, разработка программного обеспечения, визуализация, написание черновика рукописи.

В.С. Тюрина: разработка концепции, разработка методологии, валидация результатов, написание рукописи — внесение замечаний и исправлений.

А.С. Чепурненко: научное руководство, получение финансирования, административное руководство исследовательским проектом.

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

About the Authors:

Tatiana N. Kondratieva, Cand.Sci. (Eng.), Associate Professor of the Mathematics and Informatics Department, Don State Technical University (1, Gagarin Sq., Rostov-on-Don, 344003, Russian Federation), [SPIN-code](#), [ORCID](#), [ScopusID](#), [ResearcherID](#), [ResearchGate](#), ktn618@yandex.ru

Vasilina S. Tyurina, Cand.Sci. (Eng.), Associate Professor of the Structural Mechanics and Theory of Structures Department, Don State Technical University (1, Gagarin Sq., Rostov-on-Don, 344003, Russian Federation), [SPIN-code](#), [ORCID](#), [ScopusID](#), [ResearchGate](#), vasilina.93@mail.ru

Anton S. Chepurnenko, Dr.Sci. (Eng.), Professor of the Structural Mechanics and Theory of Structures Department, Don State Technical University (1, Gagarin Sq., Rostov-on-Don, 344003, Russian Federation), [SPIN-code](#), [ORCID](#), [ScopusID](#), [ResearcherID](#), [ResearchGate](#), anton_chepurnenk@mail.ru

Claimed Contributorship:

TN Kondratieva: investigation, data curation, formal analysis, software, visualization, writing — original draft preparation.

VS Tyurina: conceptualization, methodology, validation, writing — review & editing.

AS Chepurnenko: supervision, funding acquisition, project administration.

Conflict of Interest Statement: the authors declare no conflict of interest.

All authors have read and approved the final manuscript.

Поступила в редакцию / Received 14.02.2026

Поступила после рецензирования / Reviewed 06.04.2026

Принята к публикации / Accepted 25.04.2026







МЕХАНИКА
MECHANICS

УДК 620.3:616.314

Оригинальное эмпирическое исследование

<https://doi.org/10.23947/2687-1653-2026-26-2-2679>**Электродное формирование биомиметического
органоминерального покрытия на природной эмали человеческого
зуба: морфология и поверхностные механические свойства**

EDN: BVNNLU

П.В. Середин¹  , Д.Л. Голощапов¹ , Т.А. Литвинова² ,
О.В. Дехнич² , Ю.А. Ипполитов³ ¹ Воронежский государственный университет, г. Воронеж, Российская Федерация² Белгородский государственный национальный исследовательский университет,
г. Белгород, Российская Федерация³ Воронежский государственный медицинский университет имени Н.Н. Бурденко,
г. Воронеж, Российская Федерация✉ paul@phys.vsu.ru**Аннотация**

Введение. Разработка покрытий, способных воспроизводить структурно-функциональные свойства зубной эмали, представляет значительный интерес для стоматологического материаловедения и биомиметической инженерии поверхностей. Несмотря на развитие биомиметических кальций-фосфатных систем, наиболее распространённые подходы по-прежнему основаны на многостадийных протоколах, чувствительных к условиям формирования межфазного слоя, и не обеспечивают в полной мере одновременного сокращения времени осаждения, контроля морфологии покрытия и воспроизводимого механического отклика поверхности. Цель данной работы состояла в экспериментальной оценке возможности одностадийного формирования биомиметического гибридного nHAp/PDA-покрытия в электрическом поле с использованием изолированных электродов, а также в установлении влияния режима осаждения на морфологию поверхности и микротвёрдость системы «покрытие–подложка».

Материалы и методы. В качестве модели природной апатитовой подложки использовали сегменты нативной эмали постоянных зубов человека. Сравнивали четыре состояния поверхности: нативную эмаль; слой nHAp/AA, сформированный после кислотного кондиционирования; покрытие PDA/nHAp, полученное в последовательном режиме; гибридное покрытие, сформированное при одновременной электрополовой минерализации и ускоренной полимеризации дофамина. Осаждение выполняли в потенциостатической ячейке с изолированными медными электродами. Морфологию поверхности оценивали методами сканирующей электронной и атомно-силовой микроскопии. Поверхностный механический отклик исследовали по микротвёрдости Виккерса при нагрузке 50 г, AFM-картированию отпечатков и локальной наноиндентации.

Результаты исследования. Установлено, что одностадийный электрополовой режим обеспечивает формирование наиболее плотного и равномерного поверхностного слоя толщиной порядка 1 мкм с минимальной шероховатостью около 20 нм. Для образца D зарегистрированы наибольшие значения поверхностной микротвёрдости — около 310 VHN; для нативной эмали они составили около 280 VHN, для образца В — около 120 VHN, для образца С — около 190 VHN. Однофакторный дисперсионный анализ подтвердил статистически значимое влияние типа образца на микротвёрдость ($p < 0,001$). AFM-картирование отпечатков подтвердило корректность оптической оценки диагоналей на текстурированной поверхности.

Обсуждение. Повышение поверхностной микротвёрдости образца, сформированного в электрополовом режиме, связано, по-видимому, с более организованным межфазным взаимодействием при участии полидофамина и более плотной упаковкой минеральной составляющей покрытия. При этом микротвёрдость Виккерса и AFM-наноиндентация характеризуют различные масштабные уровни механического отклика и должны интерпретироваться как взаимодополняющие методы.

Заключение. Показано, что одностадийное формирование гибридного nHAp/PDA-покрытия в электрическом поле с использованием изолированных электродов позволяет получить морфологически организованный слой с поверхностным механическим откликом, сопоставимым с интактной эмалью. Предложенный подход представляет интерес для ускоренного формирования функциональных органоминеральных покрытий на апатитсодержащих подложках.

Ключевые слова: электрическое поле, органоминеральное покрытие, природная эмаль, микротвёрдость, атомно-силовая микроскопия

Благодарности. Авторы выражают благодарность «Бразильской лаборатории синхротронного излучения (LNLS)» Бразильского центра исследований в области энергетики и материалов (CNPEM) за предоставленное оборудование в рамках проекта №20252761 и возможность проведения сопутствующих исследований.

Финансирование. Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда, проект №26-15-20057, <https://rscf.ru/project/26-15-20057>

Для цитирования. Середин П.В., Голошчапов Д.Л., Литвинова Т.А., Дехнич О.В., Ипполитов Ю.А. Электрополевое формирование биомиметического органоминерального покрытия на природной эмали человеческого зуба: морфология и поверхностные механические свойства. *Advanced Engineering Research (Rostov-on-Don)*. 2026;26(2):2679. <https://doi.org/10.23947/2687-1653-2026-26-2-2679>

Original Empirical Research

Electric-Field-Assisted Formation of a Biomimetic Organomineral Coating on Natural Human Tooth Enamel: Morphology and Surface Mechanical Properties

Pavel V. Seredin¹  , Dmitry L. Goloshchapov¹ , Tatyana A. Litvinova² ,

Olga V. Dekhnich² , Yury A. Ippolitov³ 

¹ Voronezh State University, Voronezh, Russian Federation

² Belgorod National Research University, Belgorod, Russian Federation

³ N.N. Burdenko Voronezh State Medical University, Voronezh, Russian Federation

 paul@phys.vsu.ru

Abstract

Introduction. The development of coatings capable of reproducing the structural and functional properties of dental enamel is of considerable interest for dental materials science and biomimetic surface engineering. Despite the progress achieved in biomimetic calcium-phosphate systems, the most common approaches still rely on multistep protocols that are highly sensitive to interfacial-layer formation conditions and do not always ensure simultaneous reduction of deposition time, control of coating morphology, and reproducible surface mechanical response. The objective of this study was to experimentally evaluate the feasibility of one-step formation of a biomimetic hybrid nHAp/PDA coating in an electric field using isolated electrodes, and to determine the effect of the deposition mode on surface morphology and the surface microhardness of the “coating–substrate” system.

Materials and Methods. Segments of native human permanent tooth enamel were used as a model of a natural apatite-containing substrate. Four surface conditions were compared: native enamel, an nHAp/AA layer formed after acid conditioning, a PDA/nHAp coating obtained by sequential deposition, and a hybrid coating formed via simultaneous electric-field-assisted mineralization and accelerated dopamine polymerization. Deposition was performed in a potentiostatic cell with isolated copper electrodes. Surface morphology was evaluated using scanning electron microscopy and atomic force microscopy (AFM). Surface mechanical response was assessed by Vickers microhardness testing at a 50 g load, AFM mapping of indentation imprints, and local nanoindentation.

Results. The one-step electric-field-assisted mode was found to produce the densest and most uniform surface layer, approximately 1 μm thick, with a minimum roughness of about 20 nm. Sample D demonstrated the highest surface microhardness values, reaching approximately 310 VHN, whereas native enamel showed values of approximately 280 VHN, sample B — about 120 VHN, and sample C — about 190 VHN. One-way ANOVA confirmed a statistically significant effect of sample type on microhardness ($p < 0.001$). AFM mapping of the indentation imprints confirmed the accuracy of optical diagonal measurements on the textured surface.

Discussion. The increased surface microhardness of the electric-field-assisted sample appears to be associated with more organized interfacial interactions involving polydopamine and a denser packing of the mineral component of the coating. At the same time, Vickers microhardness testing and AFM nanoindentation characterize different scale levels of the mechanical response and should therefore be interpreted as complementary methods.

Conclusion. It is shown that one-step formation of a hybrid nHAp/PDA coating in an electric field using isolated electrodes makes it possible to obtain a morphologically organized layer with a surface mechanical response comparable to that of intact enamel. The proposed approach appears promising for the accelerated formation of functional organomineral coatings on apatite-containing substrates.

Keywords: electric field, organomineral coating, native enamel, microhardness atomic force microscopy

Acknowledgements. The authors would like to thank the Brazilian Synchrotron Light Laboratory (LNLS), Brazilian Center for Research in Energy and Materials (CNPEM), for providing access to equipment and related experimental infrastructure for SINS and s-SNOM experiments at the Imbuia beamline of Sirius (Proposal 20252761).

Funding Information. The study was supported by the Russian Science Foundation, project No. 26-15-20057, <https://rscf.ru/project/26-15-20057>

For Citation. Seredin PV, Goloshchapov DL, Litvinova TA, Dekhnich OV, Ippolitov YuA. Electric-Field-Assisted Formation of a Biomimetic Organomineral Coating on Natural Human Tooth Enamel: Morphology and Surface Mechanical Properties. *Advanced Engineering Research (Rostov-on-Don)*. 2026;26(2):2679. <https://doi.org/10.23947/2687-1653-2026-26-2-2679>

Введение. Эмаль представляет собой высокоминерализованную иерархически организованную ткань, механические характеристики которой определяются ориентацией апатитовых кристаллитов, градиентом состава и структурной анизотропией [1]. Научная и прикладная значимость разработки покрытий, способных частично воспроизводить либо восстанавливать указанные характеристики, связана не только с задачами локальной регенерации твёрдых тканей зуба, но и с созданием управляемых биомиметических систем, в которых межфазная организация и механический отклик регулируются составом и режимом формирования покрытия [2].

Современные подходы к реминерализации и получению эмалеподобных покрытий включают системы на основе функциональных неорганических материалов, органических матриц и полимерных носителей [3]. Отдельное направление представлено гидрогелевыми системами, позволяющими моделировать гелеобразную среду минерализации и контролировать локальную доставку ионов [4]. Значительный интерес представляет гидроксипапатит (nHAp) как функциональный материал, обладающий высокой биоактивностью и структурным сходством с минеральной фазой твёрдых тканей [5]. Клинические и материаловедческие обзоры подтверждают высокий потенциал гидроксипапатитсодержащих систем для профилактики повреждений и восстановления эмали [6]. Однако применение преимущественно минеральных систем не всегда обеспечивает устойчивую адгезию покрытия к поверхности эмали и контролируемую межфазную организацию на границе «покрытие – подложка», что ограничивает воспроизводимость морфологии и механических свойств формируемого слоя.

Вместе с тем полидофамин (PDA) рассматривается как один из наиболее универсальных межфазных компонентов благодаря выраженным адгезионным свойствам и способности инициировать связывание неорганической фазы с подложкой [7]. Современные обзоры, посвящённые химии полидофамина, показывают, что такие плёнки не только стабилизируют поверхность, но и формируют функциональную межфазу, способную направлять минералообразование [8]. Хотя схемы ускоренного осаждения с участием системы $\text{CuSO}_4/\text{H}_2\text{O}_2$ позволяют существенно сократить время получения более однородного слоя [9], проблема воспроизводимого управления морфологией и межфазной организацией гибридных покрытий остаётся актуальной. Для стоматологических применений важно, что PDA способен инициировать минералообразование на деминерализованной эмали [10] и усиливать реминерализационный эффект в одностадийных покрытиях, сочетающих полидофамин и фторид-ион [11]. Показано также, что полидофаминовые покрытия влияют на характер нуклеации кальций-фосфатной фазы на поверхности минерализованных подложек [12].

Вместе с тем альтернативные биомиметические матрицы, включая амелогениноподобные системы, способны направлять ориентированное формирование эмалеподобной минеральной структуры, однако, как правило, требуют более сложных многостадийных протоколов [13]. Электрокинетические подходы, напротив, улучшают транспорт ионов в толщу эмали, но сами по себе не решают задачу контролируемой межфазной организации гибридного покрытия [14]. В ранее выполненной авторами работе была показана возможность быстрого осаждения гибридных гидроксипапатит-полидофаминовых слоёв на природной эмали [15]. Однако вопрос о том, может ли одностадийное формирование покрытия в электрическом поле при изолированных электродах одновременно обеспечить сокращение времени осаждения, контролируемую морфологию и воспроизводимый поверхностный механический отклик, остаётся недостаточно изученным. Особый интерес представляет возможность более локализованного управления процессами осаждения и межфазного взаимодействия в условиях пространственного разделения электродных процессов, что потенциально позволяет повысить однородность и структурную организованность формируемого гибридного слоя.

Целью настоящей работы является экспериментальная оценка возможности одностадийного формирования гибридного nHAp/PDA-покрытия в электрическом поле с использованием изолированных электродов, а также установление влияния режима осаждения на морфологию поверхности и поверхностную микротвёрдость системы «покрытие – подложка».

Данное исследование отвечает на следующие вопросы.

1. Обеспечивает ли одностадийный электрополевой режим более равномерное и структурно организованное покрытие по сравнению с последовательными схемами осаждения?
2. Сопровождаются ли морфологические изменения поверхности ростом поверхностной микротвёрдости?
3. Соплосуются ли результаты микротвёрдости Виккерса и локального АСМ-наноиндентирования при оценке механического отклика сформированного гибридного слоя?

Материалы и методы. Исследование включало следующие основные этапы.

Этап 1 — подготовка образцов зубной эмали. В качестве подложки использовали сегменты эмали постоянных зубов человека без видимых кариозных поражений, трещин и реставраций. Подготовку эмалевых образцов, их первичную обработку и формирование исследуемых серий проводили в соответствии с протоколом, ранее подробно описанным для близкой системы осаждения [15]. На этапе отбора зубы подвергали предварительному клиническому осмотру для подтверждения отсутствия кариозных поражений, дефектов, включая эрозии и клиновидные повреждения, а также визуально определяемых изменений структуры эмали.

Сегменты зубной эмали размером 5×5 мм² и толщиной приблизительно 2 мм получали с использованием алмазной низкооборотной пилы с водяным охлаждением. После завершения сегментации срезы помещали в герметичные контейнеры с поддержанием постоянной влажности, где они хранились до начала экспериментальных исследований.

Этап 2 — формирование серий А и В. Образец А представлял собой нативную эмаль и использовался в качестве контрольной группы. Для получения образца В поверхность нативной эмали кондиционировали 37 %-ной ортофосфорной кислотой в течение 30 с, после чего осуществляли осаждение слоя nHAp/AA.

Этап 3 — формирование серии С. После кондиционирования поверхности 37 %-ной ортофосфорной кислотой в течение 30 с и последующей щелочной активации последовательно формировали гибридный слой: сначала проводили полимеризацию дофамина в течение 2 ч, затем выполняли осаждение nHAp. Таким образом получали покрытие PDA/nHAp, позволяющее оценить вклад полидофамина при последовательной организации межфазного слоя и минеральной фазы.

Этап 4 — формирование серии D. Образец D получали в одну стадию при совместном протекании электрополевой минерализации и полимеризации дофамина. Покрытие формировали в потенциостатической ячейке с изолированными медными электродами, не контактировавшими с рабочим раствором. Базовый режим одностадийного осаждения включал TRIS-буфер с pH = 8,5, дофамин гидрохлорид — 2 мг/мл, 5 мМ CuSO₄·6H₂O, 20 ммоль H₂O₂, суспензию nHAp со средним размером частиц 20–30 нм и конечной концентрацией 1 мг/мл. В качестве аминокислотного компонента использовали аспарагиновую кислоту в концентрации 0,1 мг/мл. Напряжение составляло около 45 В, расстояние между электродами — около 4 мм, продолжительность процесса — 4 ч. Использование системы Cu²⁺/H₂O₂ соответствует опубликованным данным об ускоренном осаждении более однородных плёнок PDA [8]. Такая схема позволяла последовательно оценить вклад предварительной обработки, минеральной фазы, полидофамина и электрического поля. Отдельная контрольная серия без электрического поля или без ускоряющей системы в рамках настоящего исследования не предусматривалась, что учитывали при интерпретации полученных результатов.

Этап 5 — морфологический анализ полученных образцов. Морфологию поверхности исследовали методами сканирующей электронной микроскопии (СЭМ) на приборе JEOL JSM-6700F (JEOL, Япония) и атомно-силовой микроскопии с использованием установки для ультрамикроскопии станции IMBUA-nano Бразильской лаборатории синхротронного излучения (LNLS), сочетающей сканирующую оптическую микроскопию ближнего поля (s-SNOM) с ИК-излучением синхротрона. СЭМ применяли для оценки сплошности слоя, характера перекрытия подложки и определения толщины покрытия на поперечных сколах. Оборудование IMBUA-nano использовали для анализа нанорельефа, профилей поверхности и геометрии отпечатков. Количественную оценку шероховатости выполняли по параметру Ra на сканах 10 × 10 мкм. Выбор указанных методов и параметры их применения соответствовали ранее использованному протоколу исследования гибридных покрытий на эмали [15, 16].

Этап 6 — оценка механических свойств и статистическая обработка. Поверхностные механические свойства оценивали по микротвёрдости Виккерса на приборе HVS-1000 (TIME Group Inc., Китай) при нагрузке 50 г и времени выдержки 15 с; для каждого образца выполняли по 10 измерений. Поскольку толщина покрытия является конечной, измеряемую величину интерпретировали как поверхностную микротвёрдость композитной системы «покрытие – эмаль», а не как собственную твёрдость изолированного слоя [16]. Для образца D дополнительно проводили АСМ-картирование отпечатков Виккерса и локальный анализ кривых DvZ/DFL.

Такая последовательность этапов позволяла сопоставить влияние предварительной обработки, способа формирования гибридного слоя и режима осаждения на морфологические и механические характеристики системы «покрытие — эмаль».

Статистическую обработку результатов проводили методом однофакторного дисперсионного анализа ANOVA с последующим множественным попарным сравнением групп по критерию Тьюки; различия считали статистически значимыми при $p < 0,05$.

Результаты исследования. В соответствии с целью работы сначала была проанализирована морфология покрытий, сформированных в различных режимах, а затем оценён их поверхностный механический отклик. Сравнение режимов формирования покрытия показало, что тип межфазного взаимодействия существенно влияет на конечную морфологию поверхности (таблица 1). Для образца В, в котором после предобработки осаждали слой nНАр/АА, формировался развитый, но тонкий и слабо интегрированный слой толщиной около 0,4 мкм; по данным морфометрического анализа шероховатость поверхности в этой серии достигала $47,8 \pm 5,6$ нм, тогда как для нативной эмали она составляла $22,1 \pm 3,4$ нм. При последовательном введении полидофамина в образце С толщина покрытия возрастала примерно до 0,9 мкм, а параметр R_a снижался до $25,4 \pm 3,2$ нм. Наиболее выраженный эффект зарегистрирован для образца D: одностадийный электрополевой режим обеспечивал более равномерное перекрытие подложки и формирование плотного слоя толщиной 1,0–1,2 мкм с минимальной шероховатостью $18,3 \pm 2,6$ нм, что может свидетельствовать о более высокой степени морфологической упорядоченности покрытия.

По данным АСМ для образца D характерно наличие упорядоченных наноагрегатов размером около 50–80 нм, формирующих выраженный рельеф и более плотную поверхностную упаковку. Наличие более плотной упаковки и упорядоченных наноагрегатов согласуется с предположением о более организованной межфазной структуре покрытия [13, 18].

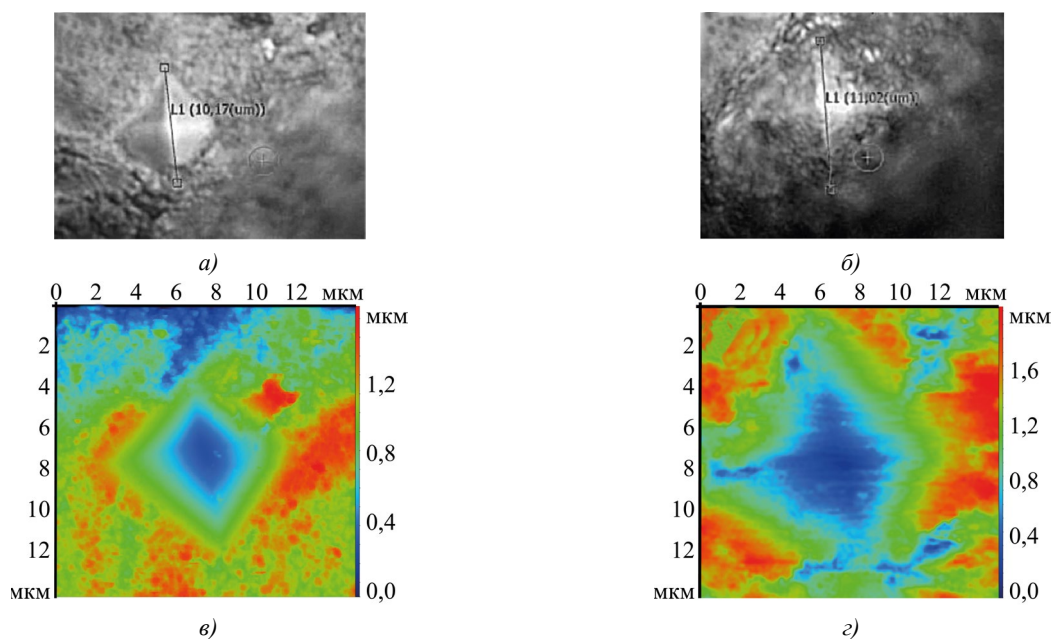
Таблица 1

Поверхностная микротвёрдость Виккерса при нагрузке 50 г

Показатель	А, нативная эмаль	В, nНАр/АА	С, PDA/nНАр	Д, (электрополевой)
VHN, М ± SD	280 ± 20	120 ± 10	190 ± 13	310 ± 22

Результаты измерений микротвёрдости показали, что минимальное значение характерно для образца В — около 120 VHN. Для образца С зарегистрировано повышение твёрдости примерно до 190 VHN. Максимальные значения получены для образца D — около 310 VHN, что несколько превышает средний уровень, характерный для нативной эмали, — около 280 VHN. Однофакторный дисперсионный анализ показал статистически значимое влияние типа образца на микротвёрдость ($p < 0,001$). По данным апостериорного анализа по критерию Тьюки достоверные различия выявлены между всеми парами образцов, за исключением пары А–D, что свидетельствует об отсутствии статистически значимых различий между образцом D и интактной эмалью в условиях проведённого эксперимента.

Для верификации механических характеристик образца D сначала были проанализированы оптические изображения отпечатков индентора Виккерса на нативной эмали и в электрополевой серии (рис. 1 а, б). Для более точного определения геометрии отпечатков на текстурированной поверхности их затем дополнительно исследовали методом АСМ-картирования (рис. 1 в, г). По данным такого анализа для образца D были получены значения порядка 320 VHN при нагрузке 50 г и порядка 290 VHN при нагрузке 10 г. Полученные значения согласуются с результатами оптического микротвердомера и подтверждают, что высокий уровень поверхностной микротвёрдости не является артефактом измерения диагоналей отпечатка на текстурированной поверхности (рис. 1 а–г).



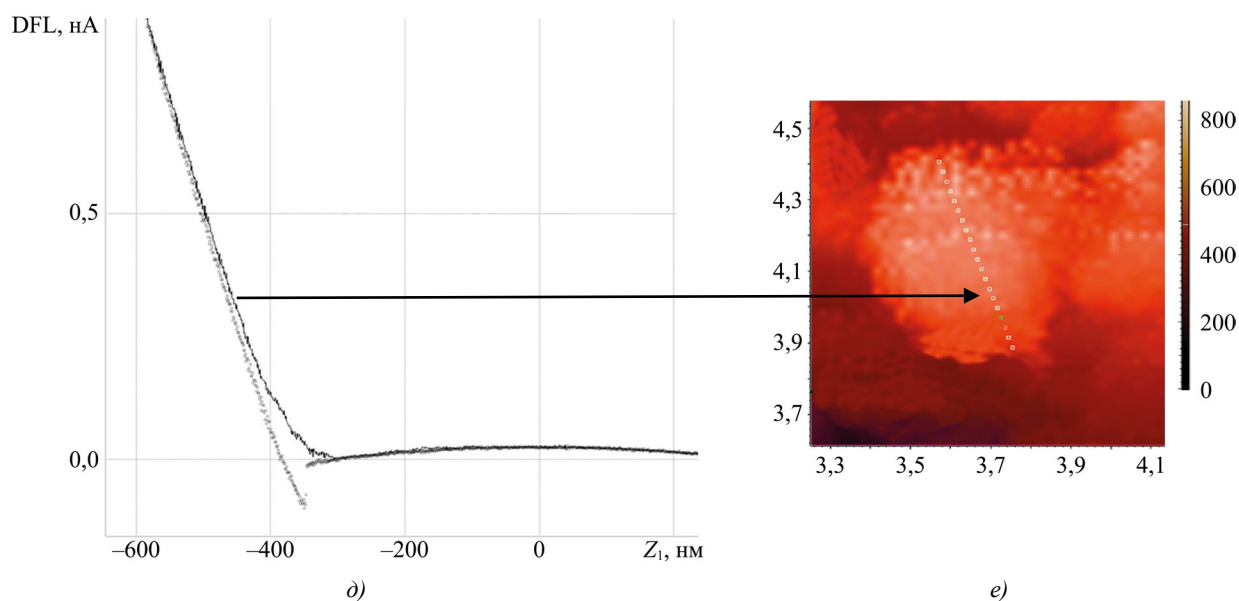


Рис. 1. Исследования механических характеристик нативной эмали и образца D: *a, б* — оптические изображения отпечатков индентора Виккерса; *в, г* — АСМ-топография отпечатков; *д* — типичная силовая кривая локального АСМ-наноиндентирования; *е* — АСМ-изображение участка поверхности, на котором регистрировали силовой отклик

Для дополнительной оценки локального механического отклика приповерхностного слоя проводили АСМ-наноиндентирование.

При локальном АСМ-наноиндентировании на глубинах менее 50 нм регистрировался отклик приповерхностной PDA-богатой оболочки с модулем Юнга порядка 1 ГПа; типичная силовая кривая приведена на рис. 1 *д*, а участок поверхности, на котором регистрировали силовой отклик, показан на рис. 1 *е*.

Обсуждение. Полученные результаты показывают, что более высокий уровень поверхностной микротвёрдости у образца D связан не только с наличием минеральной составляющей, но и с характером межфазной организации гибридного слоя. Это согласуется с уже известными данными о том, что полидофамин способен выполнять функцию адгезионной межфазы и одновременно влиять на ранние стадии минералообразования [8, 10, 12].

По сравнению с образцом В, у которого после кислотного кондиционирования формировался тонкий и слабо интегрированный слой, а также с образцом С, где улучшение морфологии достигалось преимущественно благодаря последовательному введению PDA, электрополевой режим обеспечивал более плотную упаковку покрытия и более равномерное перекрытие подложки. Вероятно, более организованная межфазная структура и снижение локальной неоднородности покрытия способствовали стабильному распределению механической нагрузки при индентировании. Вместе с тем представленные данные не позволяют однозначно связать повышение твёрдости исключительно с воздействием электрического поля, поскольку химическое ускорение полимеризации также могло вносить заметный вклад.

Принципиально важно, что регистрируемая микротвёрдость характеризует не изолированное покрытие, а композитную систему «покрытие – подложка». Сопоставление толщины слоя порядка 1,0–1,2 мкм с масштабом деформации при нагрузке 50 г показывает, что вклад подложки в измеряемый механический отклик остаётся существенным. Поэтому полученные значения корректнее интерпретировать как поверхностную микротвёрдость системы в целом. В этом смысле данные индентирования по Виккерсу и АСМ-наноиндентирования являются взаимодополняющими: первая методика отражает интегральный ответ гибридного слоя и подложки, тогда как вторая характеризует локальные свойства приповерхностной PDA-богатой оболочки [16].

Полученные данные подтверждают, что сочетание органической межфазы и минерального компонента может играть важную роль в формировании механически стабильных эмалеподобных покрытий. Результаты согласуются с современными подходами, согласно которым наиболее перспективные биомиметические материалы для твёрдых тканей сочетают управляемую органическую межфазу и минеральный компонент [2, 17, 18]. В этом контексте одностадийная схема с изолированными электродами представляет интерес не только как вариант реминерализации, но и как инженерная стратегия ускоренного формирования организованного поверхностного слоя. Ограничением работы остаётся отсутствие специальной контрольной серии, позволяющей полностью разделить вклад электрического поля и химического ускорителя полимеризации, что не позволяет полностью разделить вклад электрического поля и химического ускорителя в наблюдаемые изменения морфологии и механических характеристик покрытия. Дальнейшие исследования должны включать специальные контрольные режимы и оценку долговременной стабильности сформированных покрытий, в том числе с использованием комплекса методов и алгоритмов машинного обучения [19].

Заключение. Разработан способ одностадийного формирования гибридного nHAр/PDA-покрытия в электрическом поле с использованием изолированных электродов.

Показано, что электрополевой режим обеспечивает формирование более плотного и морфологически организованного слоя по сравнению с последовательными схемами осаждения и сопровождается наибольшими значениями поверхностной микротвёрдости — до 310 VHN при нагрузке 50 г.

Результаты АСМ-анализа отпечатков и локального наномеханического тестирования подтверждают согласованность оценки механического отклика на различных масштабных уровнях.

Полученные данные позволяют рассматривать предложенный подход как перспективный способ ускоренного формирования функциональных органоинеральных покрытий на апатитсодержащих подложках. Дальнейшие исследования целесообразно направить на варьирование параметров электрического поля, контроль толщины слоя и оценку долговременной стабильности покрытия при комбинированном химико-механическом воздействии.

Список литературы / References

1. Ya-Rong Zhang, Wen Du, Xue-Dong Zhou, Hai-Yang Yu. Review of Research on the Mechanical Properties of the Human Tooth. *International Journal of Oral Science*. 2014;6(2):61–69. <https://doi.org/10.1038/ijos.2014.21>
2. Shuxian Tang, Zhiyun Dong, Xiang Ke, Jun Luo, Jianshu Li. Advances in Biomineralization-Inspired Materials for Hard Tissue Repair. *International Journal of Oral Science*. 2021;13:42. <https://doi.org/10.1038/s41368-021-00147-z>
3. Jiarong Xu, Hui Shi, Jun Luo, Haiyan Yao, Pei Wang, Zhihua Li, et al. Advanced Materials for Enamel Remineralization. *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology*. 2022;10:985881. <https://doi.org/10.3389/fbioe.2022.985881>
4. Jiayi Liao, Junhong Qiu, Yarfang Lin, Zhihua Li Z. The Application of Hydrogels for Enamel Remineralization. *Heliyon*. 2024;10(13):e33574. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e33574>
5. Sudip Mondal, Sumin Park, Jaeyeop Choi, Thi Thu Ha Vu, Vu Hoang Minh Doan, Truong Tien Vo, et al. Hydroxyapatite: A Journey from Biomaterials to Advanced Functional Materials. *Advances in Colloid and Interface Science*. 2023;321:103013. <https://doi.org/10.1016/j.cis.2023.103013>
6. Pawinska M, Paszynska E, Amaechi BT, Meyer F, Enax J, Limeback H. Clinical Evidence of Caries Prevention by Hydroxyapatite: An Updated Systematic Review and Meta-Analysis. *Journal of Dentistry*. 2024;151:105429. <https://doi.org/10.1016/j.jdent.2024.105429>
7. Haeshin Lee, Dellatore SM, Miller WM, Messersmith PB. Mussel-Inspired Surface Chemistry for Multifunctional Coatings. *Science*. 2007;318(5849):426–430. <https://doi.org/10.1126/science.1147241>
8. Ji Hyun Ryu, Messersmith PB, Haeshin Lee. Polydopamine Surface Chemistry: A Decade of Discovery. *ACS Applied Materials and Interfaces*. 2018;10(9):7523–7540. <https://doi.org/10.1021/acsami.7b19865>
9. Chao Zhang, Yang Ou, Wen-Xi Lei, Ling-Shu Wan, Jian Ji, Zhi-Kang Xu. CuSO₄/H₂O₂-Induced Rapid Deposition of Polydopamine Coatings with High Uniformity and Enhanced Stability. *Angewandte Chemie International Edition*. 2016;55(9):3054–3057. <https://doi.org/10.1002/anie.201510724>
10. Yun-Zhi Zhou, Ying Cao, Wei Liu, Chun Hung Chu, Quan-Li Li. Polydopamine-Induced Tooth Remineralization. *ACS Applied Materials and Interfaces*. 2012;4(12):6901–6910. <https://doi.org/10.1021/am302041b>
11. Seok-Min Choi, Hee-Won Jung, Ji Hyun Ryu, Hyung-Keun You. Effect of Polydopamine and Fluoride Ion Coating on Dental Enamel Remineralization: An in vitro Study. *BMC Oral Health*. 2023;23:526. <https://doi.org/10.1186/s12903-023-03221-6>
12. Murari G, Bock N, Huan Zhou, Lei Yang, Liew T, Fox K, et al. Effects of Polydopamine Coatings on Nucleation Modes of Surface Mineralization from Simulated Body Fluid. *Scientific Reports*. 2020;10:14982. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-71900-3>
13. Dong Wang, Jingjing Deng, Xuliang Deng, Changqing Fang, Xu Zhang, Peng Yang. Controlling Enamel Remineralization by Amyloid-Like Amelogenin Mimics. *Advanced Materials*. 2020;32(31):e2002080. <https://doi.org/10.1002/adma.202002080>
14. NamBeng Tay, HiongYapGan, Frederico Barbosa de Sousa, Lu Shen, Diego Figueiredo Nóbrega, Chenhui Peng, et al. Improved Mineralization of Dental Enamel by Electrokinetic Delivery of F⁻ and Ca²⁺ Ions. *Scientific Reports*. 2023;13:516. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-26423-4>
15. Seredin P, Goloshchapov D, Emelyanova A, Eremeev K, Peshkov Y, Shikhaliev K, et al. Rapid deposition of the biomimetic hydroxyapatite-polydopamine-amino acid composite layers onto the natural enamel. *ACS Omega*. 2024;9(15):17012–17027. <https://doi.org/10.1021/acsomega.3c08491>
16. Chi-Dat Lam, Soyeun Park. Nanomechanical Characterization of Soft Nanomaterial Using Atomic Force Microscopy. *Materials Today Bio*. 2025;31:101506. <https://doi.org/10.1016/j.mtbio.2025.101506>
17. Xinyu Luo, Jiayue Niu, Guanyu Su, Linxi Zhou, Xue Zhang, Ying Liu, et al. Research Progress of Biomimetic materials in oral medicine. *Journal of Biological Engineering*. 2023;17:72. <https://doi.org/10.1186/s13036-023-00382-4>

18. Seredin P, Goloshchapov D, Peshkov Ya, Potapov A, Gribanova Ya, Shikhaliev K, et al. Biomimetic Organomineral Layers with Antibacterial Properties Based on Di/Tetrahydroquinolinediol and Nanocrystalline Hydroxyapatite Deposited on Enamel Surface. *Biomaterials Science*. 2025;13(9):2444–2461. <https://doi.org/10.1039/D5BM00070J>

19. Kondratieva T.N., Chepurnenko A.S. Prediction of Rheological Parameters of Polymers by Machine Learning Methods. *Advanced Engineering Research (Rostov-on-Don)*. 2024;24(1):36–47. <https://doi.org/10.23947/2687-1653-2024-24-1-36-47>

Об авторах:

Павел Владимирович Середин, доктор физико-математических наук, профессор, заведующий кафедрой «Физика твёрдого тела и наноструктур» Воронежского государственного университета (394018, Российская Федерация, г. Воронеж, Университетская площадь, 1), [SPIN-код](#), [ORCID](#), [ScopusID](#), [ResearcherID](#), [ResearchGate](#), paul@phys.vsu.ru

Дмитрий Львович Голощاپов, кандидат физико-математических наук, доцент кафедры «Физика твёрдого тела и наноструктур» Воронежского государственного университета (394018, Российская Федерация, г. Воронеж, Университетская площадь, 1), [SPIN-код](#), [ORCID](#), [ScopusID](#), [ResearcherID](#), [ResearchGate](#), goloshchapov@phys.vsu.ru

Татьяна Александровна Литвинова, доктор филологических наук, профессор кафедры «Возрастная и социальная психология» Белгородского государственного национального исследовательского университета (308015, Российская Федерация, г. Белгород, ул. Победы, 85), [SPIN-код](#), [ORCID](#), [ScopusID](#), [ResearcherID](#), [ResearchGate](#), centr_rus_yaz@mail.ru

Ольга Витальевна Дехнич, кандидат филологических наук, доцент кафедры «Английская филология и межкультурная коммуникация» Института межкультурной коммуникации и международных отношений Белгородского государственного национального исследовательского университета (308015, Российская Федерация, г. Белгород, ул. Победы, 85), [SPIN-код](#), [ORCID](#), [ScopusID](#), [ResearcherID](#), [ResearchGate](#), dekhnich@bsu.edu.ru

Юрий Алексеевич Ипполитов, доктор медицинских наук, профессор кафедры «Детская стоматология с ортодонтией» Воронежского государственного медицинского университета имени Н.Н. Бурденко (394036, Российская Федерация, г. Воронеж, ул. Студенческая, 10), [SPIN-код](#), [ORCID](#), [ScopusID](#), [ResearcherID](#), [ResearchGate](#), dsvigma@mail.ru

Заявленный вклад авторов:

П.В. Середин: разработка концепции, курирование данных, формальный анализ, проведение исследования, разработка методологии, административное руководство исследовательским проектом, валидация результатов, написание черновика рукописи.

Д.Л. Голощاپов: получение финансирования, формальный анализ, проведение исследования.

Т.А. Литвинова: курирование данных, формальный анализ, валидация результатов.

О.В. Дехнич: написание рукописи – внесение замечаний и исправлений.

Ю.А. Ипполитов: проведение исследования.

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

About the Authors:

Pavel V. Seredin, Dr.Sci. (Phys.-Math.), Professor, Head of the Department of Solid State Physics and Nanostructures, Voronezh State University (1, University Sq., Voronezh, 394018, Russian Federation), [SPIN-code](#), [ORCID](#), [ScopusID](#), [ResearcherID](#), [ResearchGate](#), paul@phys.vsu.ru

Dmitry L. Goloshchapov, Cand.Sci. (Phys.-Math.), Associate Professor of the Solid-State Physics and Nanostructures Department, Voronezh State University (1, University Sq., Voronezh, 394018, Russian Federation), [SPIN-code](#), [ORCID](#), [ScopusID](#), [ResearcherID](#), [ResearchGate](#), goloshchapov@phys.vsu.ru

Tatyana A. Litvinova, Dr.Sci. (Philol.), Professor of the Developmental and Social Psychology Department, Belgorod State National Research University (85, Pobeda Str., Belgorod, 308015, Russian Federation), [SPIN-code](#), [ORCID](#), [ScopusID](#), [ResearcherID](#), [ResearchGate](#), centr_rus_yaz@mail.ru

Olga V. Dekhnich, Cand.Sci. (Philol.), Associate Professor of the Department of English Philology and Intercultural Communication, Institute of Intercultural Communication and International Relations, Belgorod National Research University (85, Pobeda Str., Belgorod, 308015, Russian Federation), [SPIN-code](#), [ORCID](#), [ScopusID](#), [ResearcherID](#), [ResearchGate](#), [ScopusID](#), dekhnich@bsu.edu.ru

Yury A. Ippolitov, Dr.Sci. (Med.), Professor of the Department of Pediatric Dentistry with Orthodontics, N.N. Burdenko Voronezh State Medical University (10, Studencheskaya Str., Voronezh, 394036, Russian Federation), [SPIN-code](#), [ORCID](#), [ScopusID](#), [ResearcherID](#), [ResearchGate](#), dsvigma@mail.ru

Claimed Contributorship:

PV Seredin: conceptualization, data curation, formal analysis, investigation, methodology, project administration, validation, writing – original draft preparation.

DL Goloshchapov: funding acquisition, formal analysis, investigation.

TA Litvinova: data curation, formal analysis, validation.

OV Dekhnich: writing – review & editing.

YA Ippolitov: investigation.

Conflict of Interest Statement: the authors declare no conflict of interest.

All authors have read and approved the final version of manuscript.

Поступила в редакцию / Received 26.05.2026

Поступила после рецензирования / Reviewed 08.06.2026

Принята к публикации / Accepted 15.06.2026

ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ INFORMATION TECHNOLOGY, COMPUTER SCIENCE AND MANAGEMENT



УДК 004.738.5

Оригинальное эмпирическое исследование

<https://doi.org/10.23947/2687-1653-2026-26-2-2228>

Эффективность и перспективы экспериментального протокола Quick User Datagram Protocol Internet Connections



EDN: CNWWGW

Д. Рахмани , С.П. Сухарев ✉

Московский технический университет связи и информатики, г. Москва, Российская Федерация

✉ s.p.suharev@mtuci.ru

Аннотация

Введение. Обеспечение и повышение доступности веб-ресурсов в сети Интернет представляет собой актуальную задачу для разработчиков информационных систем. Критическую роль в доступности страниц по протоколу Hypertext Transfer Protocol¹ (HTTP) играет версия протокола и его реализация на транспортном уровне. Протокол Quick User Datagram Protocol Internet Connections² (QUIC), разработанный компанией Google, позволяет добиться прироста скорости загрузки ресурсов за счёт применения протокола User Datagram Protocol³ (UDP) в HTTP/3. Однако QUIC имеет статус экспериментального, а в существующих исследованиях основное внимание уделяется теоретическим аспектам или общим показателям в глобальной сети. При этом остаются недостаточно изученными: одновременное сопоставление трёх версий протокола в единых контролируемых условиях, практические сложности конфигурирования и влияние алгоритмов контроля перегрузок на прикладные метрики; трудозатраты на внедрение и настройку; усилия по настройке и количественная оценка выигрыша в контролируемых условиях. Указанные пробелы формируют разрыв между теоретическими ожиданиями и практической реализацией. Поэтому целью данного исследования явилась экспериментальная оценка прикладной эффективности HTTP/3 (QUIC) в контролируемых условиях на едином тестовом стенде, включающая сопоставление HTTP/1.1, HTTP/2, HTTP/3, анализ влияния алгоритмов контроля перегрузок CUBIC и BBR и документирование процедуры конфигурирования HTTP/3-сервера.

Материалы и методы. Для исследования был развёрнут тестовый стенд на основе виртуального сервера под управлением операционной системы (ОС) Linux и веб-сервера nginx с поддержкой HTTP/1.1, HTTP/3 (QUIC), а также алгоритмов контроля перегрузок CUBIC и Bottleneck Bandwidth and Round-trip propagation time⁴ (BBR). В качестве клиента использовался браузер Google Chrome в сети 4G. Производительность оценивалась по метрике Time to First Byte⁵ (TTFB), скорости загрузки файлов и времени полной загрузки веб-страницы. Замеры выполнялись многократно с использованием Chrome DevTools⁶ и клиентских скриптов. В статье подробно описан процесс настройки сервера для работы с HTTP/3.

Результаты исследований. Эксперименты показали, что применение HTTP/3 (QUIC) сокращает время до первого байта на 23,06 % и ускоряет полную загрузку страницы на 9,5 % по сравнению с HTTP/1.1. Теоретическая модель прогнозировала снижение TTFB на 71,43 % за счёт объединённого рукопожатия QUIC и TLS 1.3. Выявленное расхождение обусловлено особенностями обработки UDP-трафика операторами, экспериментальным статусом реализации и нестабильностью мобильного канала. При скачивании крупных файлов алгоритмы CUBIC и

¹ Протокол передачи гипертекста (англ.).

² Быстрые подключения к интернету по протоколу пользовательских датаграмм (англ.).

³ Протокол пользовательских датаграмм (англ.).

⁴ Пропускная способность узкого места и время круговой задержки распространения (англ.).

⁵ Время до первого байта (англ.).

⁶ Инструменты разработчика (англ.).

BBR обеспечили сопоставимую среднюю скорость ($\approx 13,12$ и $12,75$ МБ/с соответственно). Однако BBR за первые три секунды передал на 18,2 % больше данных, демонстрируя более быстрый выход на рабочую скорость и стабильный профиль передачи.

Обсуждение. Практические результаты частично расходятся с теоретическими оценками: снижение задержки оказалось меньше прогнозируемого из-за особенностей реализации Transport Layer Security⁷ (TLS), обработки UDP-трафика провайдерами и характеристик оборудования. Показано, что преимущества QUIC/HTTP/3 наиболее заметны при множественных коротких запросах и высоких задержках. Преимущество BBR перед CUBIC реализуется не на длительных передачах, а при загрузке множества небольших ресурсов страницы — типичного сценария веб-взаимодействий. Для повышения достоверности оценки производительности планируется расширение экспериментов с различными сетевыми условиями, реализациями протокола и географически распределёнными клиентами.

Заключение. Исследование подтвердило преимущество HTTP/3 (QUIC): TTFB снизился на 23,06 %, время загрузки страницы — на 9,5 %. При этом теоретическая модель прогнозировала более существенное сокращение, что указывает на влияние особенностей реализации и сетевой среды. Сравнение CUBIC и BBR выявило преимущество BBR при передаче файлов малого объёма. Несмотря на сложность конфигурирования HTTP/3, переход оправдан для сервисов со значительным количеством ресурсов. Ограничения эксперимента требуют расширения исследований в различных сетевых сценариях.

Ключевые слова: QUIC, HTTP/3, протоколы транспортного уровня, алгоритмы контроля перегрузок, BBR, CUBIC, TTFB, производительность веб-приложений

Благодарности. Авторы выражают искреннюю признательность сотрудникам кафедры «Сетевые информационные технологии и сервисы» Московского технического университета связи и информатики за поддержку в проведении исследования. Особая благодарность выражается редакционной команде журнала за внимательное отношение к рукописи, оперативное сопровождение подготовки публикации и организацию процесса рецензирования.

Для цитирования. Рахмани Д., Сухарев С.П. Эффективность и перспективы экспериментального протокола Quick User Datagram Protocol Internet Connections. *Advanced Engineering Research (Rostov-on-Don)*. 2026;26(2):2228. <https://doi.org/10.23947/2687-1653-2026-26-2-2228>

Original Empirical Research

Efficiency and Prospects of the Experimental QUIC Protocol

Jahed Rahmani , Serafim P. Sukharev  

Moscow Technical University of Communication and Informatics, Moscow, Russian Federation

 s.p.suharev@mtuci.ru

Abstract

Introduction. Ensuring and improving the availability of web resources on the Internet is a crucial task for developers of information systems. A critical role in the page accessibility via the Hypertext Transfer Protocol (HTTP) is played by the protocol version and its transport-level implementation. The QUIC (Quick User Datagram Protocol Internet Connections) protocol, developed by Google, provides an increase in resource loading speed through the use of User Datagram Protocol (UDP) in HTTP/3. However, QUIC has an experimental status, and existing research primarily focuses on theoretical aspects or general performance metrics in the global network. At the same time, the following aspects remain insufficiently studied: simultaneous comparison of three protocol versions under unified controlled conditions, practical complexities of configuration and the effect of congestion control algorithms on application-level metrics, labor costs for implementation and configuration, tuning efforts, and quantifying gains under controlled condition.

These gaps create a disconnect between theoretical expectations and practical implementation. Therefore, the objective of this study is to experimentally evaluate the applied performance of HTTP/3 (QUIC) under controlled conditions on a unified testbed, including a comparison of HTTP/1.1, HTTP/2, and HTTP/3, an analysis of the impact of the CUBIC and BBR congestion control algorithms, and documentation of the HTTP/3 server configuration procedure.

⁷ Безопасность транспортного уровня (англ.).

Materials and Methods. A testbed was deployed based on a virtual server running the Linux operating system (OS) and the nginx web server supporting HTTP/1.1, HTTP/3 (QUIC), and congestion control algorithms CUBIC and Bottleneck Bandwidth and Round-trip propagation time (BBR). The Google Chrome browser over a 4G network was used as the client. Performance was evaluated using the Time to First Byte (TTFB) metric, file download speed, and total web page load time. Measurements were performed multiple times using Chrome DevTools and client-side scripts. The paper provides a detailed description of the server configuration process for enabling HTTP/3.

Results. The experiments showed that using HTTP/3 (QUIC) reduced the time to first byte by 23.06% and accelerated full page load by 9.5% compared to HTTP/1.1. The theoretical model predicted a TTFB reduction of 71.43% due to the combined QUIC and TLS 1.3 handshake. The observed discrepancy was attributed to the specifics of UDP traffic processing by internet service providers, the experimental status of the implementation, and mobile channel instability. When downloading large files, the CUBIC and BBR algorithms provided comparable average speeds (≈ 13.12 MB/s and 12.75 MB/s, respectively). However, BBR transmitted 18.2% more data within the first three seconds, demonstrating faster ramp-up to operational speed and a more stable transfer profile.

Discussion. Practical results partially differed from theoretical estimates: the observed latency reduction was lower than expected due to Transport Layer Security (TLS) implementation features, UDP traffic processing by Internet providers, and hardware characteristics. It is shown that the advantages of QUIC/HTTP/3 are most noticeable under conditions of multiple short requests and high latency. The advantage of BBR over CUBIC is realized not in long-duration transfers, but when loading numerous small page resources — a typical web interaction scenario. To improve the reliability of performance evaluation, further experiments are planned under various network conditions, protocol implementations, and geographically distributed clients.

Conclusion. The study confirmed the advantages of HTTP/3 (QUIC): TTFB decreased by 23.06%, and page load time by 9.5%. However, the theoretical model predicted a greater reduction, indicating the influence of implementation and network environment factors. The comparison of CUBIC and BBR revealed the advantage of BBR when transferring small-sized files. Despite the complexity of HTTP/3 configuration, the transition is justified for services with a significant number of resources. The experimental limitations indicate the need for further studies under different network scenarios.

Keywords: QUIC, HTTP/3, transport layer protocols, congestion control algorithms, BBR, CUBIC, TTFB, web performance

Acknowledgments. The authors sincerely acknowledge the Department of Network Information Technologies and Services, Moscow Technical University of Communications and Informatics, for their support in conducting this research. Special thanks are expressed to the journal editorial team for their attentive attitude to the manuscript, prompt support in the preparation of the publication, and organization of the peer-review process.

For Citation. Rahmani J, Sukharev SP. Efficiency and Prospects of the Experimental QUIC Protocol. *Advanced Engineering Research (Rostov-on-Don)*. 2026;26(2):2228. <https://doi.org/10.23947/2687-1653-2026-26-2-2228>

Введение. В настоящее время доступные веб-ресурсы представляют собой ценную базу знаний и неотъемлемую часть функционирования организаций различных направлений. Развитие рынка интернет-рекламы выступает ключевым фактором роста всей рекламной индустрии в Российской Федерации [1]. Обеспечение комфортного взаимодействия конечного пользователя с информационными системами в сети Интернет является приоритетной задачей для компаний любого масштаба. Исследования демонстрируют, что даже незначительное повышение производительности веб-страниц способно оказать существенное положительное влияние на финансовые показатели бизнеса [2, 3].

Передача данных в World Wide Web (WWW) осуществляется посредством протокола HTTP, имеющего три основные версии [4]. Поддержка современных протоколов веб-серверами способна благоприятно воздействовать на пользовательский опыт при работе с сайтами [5]. HTTP/3 базируется на протоколе QUIC [6], который разрабатывался как альтернатива Transmission Control Protocol⁸ (TCP), применявшемуся в предыдущих версиях HTTP [7], с целью повышения скорости и безопасности интернет-соединений.

Анализ существующей литературы позволяет зафиксировать как достигнутые результаты, так и существенные противоречия между ними. В [8] представлены результаты масштабного развёртывания QUIC в инфраструктуре Google: задержка ответов поискового сервиса сократилась на 8,0 % для настольных платформ и на 3,6 % для мобильных пользователей, частота прерываний видео воспроизведения снизилась на 18,0 % и 15,3 % соответственно. Авторы фиксируют, что выигрыш нарастает с увеличением метрики Round-Trip Time⁹ (RTT) и потерь пакетов, однако оказывается ниже теоретически ожидаемого — в том числе из-за ограничений реализации и спецификации сетевого оборудования операторов. Это означает, что перенос выводов на развёртывания умеренного масштаба требует самостоятельной экспериментальной проверки.

⁸ Протокол управления передачей (англ.).

⁹ Время круговой задержки (англ.).

В [9] сравнили QUIC и TCP в лабораторной среде с локально установленным сервером и констатировали минимальные различия между HTTP/2 и HTTP/3 при многопоточной передаче. В другой статье, [10], напротив, в аналогичном сценарии с уровнем потерь 12 % зафиксировали пятикратное преимущество HTTP/3 над HTTP/2. Данное противоречие обусловлено различием сетевых условий и остаётся неразрешённым применительно к штатному развёртыванию без симулированных нарушений сети. При этом работы не включают HTTP/1.1 как отправную точку для сравнений и не содержат данных по метрике TTFB.

В работе [11] были исследованы клиент-серверные протоколы с позиций отказоустойчивости и безопасности в реальных сетевых условиях и зафиксировали, что фактический прирост производительности при переходе на QUIC варьируется в зависимости от конфигурации промежуточного сетевого оборудования. Данный вывод согласуется с наблюдением авторов [8] о расхождении между теоретически ожидаемым и практически достигаемым выигрышем от протокола.

В обзорной работе о перспективах HTTP/3 и QUIC [12] показано, что совмещённое рукопожатие QUIC и встроенное шифрование TLS 1.3 формируют теоретическую основу для существенного снижения задержек. Однако учёные указывают на сложности практического развёртывания, обусловленные незрелостью поддержки протокола серверным программным обеспечением, а конкретная конфигурационная процедура в работе не приводится.

В [13] задокументировано, что 19,38 % запросов в крупном мобильном веб-сервисе приходится на фазу медленного старта, в течение которой статически заданный начальный размер окна перегрузок не соответствует реальной полосе пропускания. Тем самым исследование подтверждает, что механизм медленного старта алгоритма CUBIC создаёт измеримые задержки при передаче небольших файлов, из которых обычно состоят веб-страницы, что служит основанием для изучения BBR как альтернативного решения.

В статье [14] обоснован алгоритм BBR, использующий оценку пропускной способности канала и задержки распространения вместо потерь пакетов в качестве сигнала перегрузки. Развёртывание BBR в магистральной сети Google B4 обеспечило рост пропускной способности в 2–25 раз по сравнению с CUBIC. Вместе с тем в публикации анализируются агрегированные показатели пропускной способности, тогда как динамика скорости передачи во времени (характерная для CUBIC пилообразная форма графика в сравнении с более стабильным профилем BBR) экспериментально не визуализируется.

В работе [15] документируется, что в реализациях QUIC алгоритм CUBIC остаётся используемым по умолчанию, тогда как BBR предоставляется как опциональный. Проведённые авторами эксперименты в симуляторе ns-3 показывают, что BBR обеспечивает более высокую пропускную способность по сравнению с CUBIC при высоких задержках канала, однако при низкой полосе пропускания уступает ему по числу потерянных пакетов. При этом динамика скорости передачи во времени в работе не анализируется, что оставляет открытым вопрос о стабильности скоростного профиля каждого из алгоритмов.

Приведённый обзор позволяет выделить три взаимосвязанных пробела. В имеющихся работах HTTP/1.1, HTTP/2 и HTTP/3 не сопоставляются одновременно в единых контролируемых условиях: большинство исследований ограничено сравнением HTTP/2 и HTTP/3. Сведения о производительности протоколов существенно расходятся в зависимости от условий тестирования, а оценка в штатных условиях без прокси-серверов и искусственно вносимых потерь пакетов в эмулируемой сетевой среде представлена недостаточно. При этом практическая процедура конфигурирования стандартного веб-сервера для HTTP/3 в научной литературе не задокументирована. Таким образом, научный пробел состоит в отсутствии работ, в которых в рамках единой методологической схемы одновременно: сопоставляются HTTP/1.1, HTTP/2 и HTTP/3 в контролируемых условиях; документируется процедура конфигурирования стандартного веб-сервера для поддержки HTTP/3; оценивается влияние алгоритмов контроля перегрузок CUBIC и BBR на прикладные метрики веб-доступа. Восполнение указанного пробела определяет цель и постановку задач данного исследования.

Целью данного исследования являлась экспериментальная оценка прикладной эффективности HTTP/3 (QUIC) в контролируемых условиях на едином тестовом стенде путём сопоставления HTTP/1.1, HTTP/2 и HTTP/3, анализа влияния алгоритмов контроля перегрузок CUBIC и BBR и документирования процедуры конфигурирования HTTP/3-сервера.

Для достижения поставленной цели были решены следующие задачи:

- развернуть тестовый стенд с поддержкой HTTP/1.1, HTTP/2 и HTTP/3;
- зафиксировать последовательность конфигурирования веб-сервера для работы с HTTP/3;
- измерить и сопоставить TTFB и время полной загрузки страницы для разных версий HTTP;
- сравнить поведение алгоритмов CUBIC и BBR при передаче файла большого объёма;
- интерпретировать полученные результаты с учётом теоретических ожиданий и опубликованных исследований.

Материалы и методы

Оборудование. Для проведения экспериментов был подготовлен тестовый стенд, состоящий из арендованной в датацентре IXcellerate в Москве виртуальной машины с характеристиками: 1 Virtual Central Processing Unit¹⁰ (vCPU) 2.4 ГГц, 2 ГБ оперативной памяти под управлением операционной системы Ubuntu 22.04.5 Long-Term Support¹¹ (LTS) и личной рабочей станции под Windows 11. Оба устройства имеют выход в интернет. У виртуальной машины есть статический Internet Protocol address¹² (IP-адрес) в сети интернет с доменным именем serafimdev.com.

План исследования. В рамках работы было запланировано провести три эксперимента: сравнение скорости установления соединения с использованием HTTP/1.1, HTTP/2, HTTP/3; сравнение скорости загрузки тестовой страницы через протоколы HTTP/1.1, HTTP/2, HTTP/3; сравнение скорости передачи информации с использованием протоколов контроля перегрузок CUBIC и BBR.

Реализация экспериментов осуществлялась в следующей последовательности. На виртуальной машине был установлен и настроен веб-сервер nginx с тремя поддоменами, каждый из которых обслуживал трафик по одной версии протокола: HTTP/1.1, HTTP/2 и HTTP/3. Для оценки скорости установления соединения на каждом поддомене измерялась метрика TTFB. Затем на сервер был загружен шаблон веб-страницы, состоящий из 32 файлов, и произведены замеры времени её полной загрузки. Для эксперимента по сравнению алгоритмов контроля перегрузок на сервер был размещён файл объёмом 3 ГБ; скачивание выполнялось последовательно при активном алгоритме CUBIC (конфигурация по умолчанию) и после переключения на BBR, в обоих случаях с записью профиля скорости передачи. Последующий анализ результатов исследования включал сравнение полученных данных с теоретическими значениями, полученными на основе приведённой ниже модели.

При использовании HTTP/1.1 с шифрованием TLS 1.2 полное время до отправки первого байта данных складывается из нескольких этапов инициализации соединения (таблица 1), каждый из которых занимает некоторое количество круговых запросов между узлами сети. Таким образом, ожидаемое время инициализации защищённого соединения через HTTP/1.1 получается по формуле (1).

Таблица 1

Этапы инициализации HTTP/1.1 соединения

Этап	Назначение	Вклад в время инициализации
1	Three-way Handshake ¹³ протокола TCP	1,5 RTT
2	Обмен сообщениями ClientHello/ServerHello с согласованием шифров для протокола TLS [16]	1 RTT
3	Передача сертификата и сессионных ключей для протокола TLS [16]	1 RTT

$$T_{TCP} = 1,5 RTT + 1 RTT + 1 RTT = 3,5 RTT. \quad (1)$$

Протокол QUIC объединяет транспортное и криптографическое рукопожатие на основе TLS 1.3, сокращая суммарные затраты до 1 RTT. По формуле (2) получаем теоретический выигрыш по метрике TTFB.

$$\mu = \frac{T_{TCP} - T_{QUIC}}{T_{TCP}} \cdot 100\% = \frac{3,5 RTT - 1 RTT}{3,5 RTT} \approx 71,43\%. \quad (2)$$

Инструменты. Все измерения производили с использованием мобильного интернета 4G. На виртуальной машине был установлен nginx версии 1.27.4, поскольку поддержка HTTP/3 соединений в веб-сервер nginx добавлена с версии 1.25.0¹⁴.

Для проведения экспериментов было сконфигурировано три поддомена: http1.serafimdev.com, http2.serafimdev.com, http3.serafimdev.com с сертификатами от Let's Encrypt для протоколов HTTP/1.1, HTTP/2, HTTP/3 соответственно. При конфигурации использовалось программное обеспечение (ПО) автоматизации работы с сертификатами certbot.

Корректность выполненных на сервере настроек была проверена через инструменты разработчика браузера Google Chrome. При обмене данных по протоколу HTTP/3 в столбце протокол должны отображаться значения h3 (рис. 1). Данные инструменты также предоставляют информацию для оценки производительности веб-страницы и скоростей загрузки её компонентов и применялись для измерения времени полной загрузки страницы.

¹⁰ Виртуальное ядро процессора (англ.).

¹¹ Долгосрочная поддержка (англ.).

¹² Адрес интернет-протокола (англ.).

¹³ Трёхстороннее рукопожатие (англ.).

¹⁴ Mukhin S. Как включить HTTP/3 в NGINX. SergeyMukhin.com. URL: <https://sergymukhin.com/blog/kak-vklyuchit-http3-v-nginx> (дата обращения: 11.10.2025).







Ресурс	Статус	Протокол
 images.html	200	h3
 1.jpg	200	h3
 2.jpg	200	h3
 3.jpg	200	h3
 4.jpg	200	h3
 5.jpg	200	h3

Рис. 1. Протокол HTTP/3 в инструментах разработчика

Метрика TTFB была определена при помощи скрипта на языке программирования JavaScript, который выполнил запросы к серверу с записью значений метрики. Аналогичный подход был применён и для сбора данных, необходимых для визуализации графиков скоростей загрузки ресурсов при различных алгоритмах контроля перегрузки. При проведении измерений было важно отключить кэширование запросов в инструментах разработчика, чтобы исключить влияние локального кэша на результаты. Обработка собранных данных была выполнена с использованием библиотек `pumpru` и `matplotlib` для Python. Для интеграции нестандартного алгоритма управления перегрузкой BBR в ядро операционной системы — в данном исследовании использовалась Ubuntu 22.04.5 LTS — было необходимо загрузить соответствующий модуль — `sudo modprobe tcp_bbr` и изменить значение переменной — `sudo sysctl -w net.ipv4.tcp_congestion_control=bbr`.

Процедуры. Интернет-соединение часто бывает нестабильно, поэтому был применен статистический анализ результатов во избежание влияния выбросов на результаты исследования. В экспериментах по измерению времени инициализации соединения и скорости загрузки страницы замеры для каждого из протоколов были проведены по 20 раз. Затем был применен метод межквартильного размаха для выявления выбросов и среднее арифметическое для агрегации оставшихся измерений в финальный результат. Верхняя и нижняя границы выбросов определялись по формулам (3) и (4).

$$\text{Нижняя граница} = Q1 - 1,5 \times IQR; \tag{3}$$

$$\text{Верхняя граница} = Q3 + 1,5 \times IQR, \tag{4}$$

где $Q1$ — 25-й перцентиль, $Q3$ — 75-й перцентиль, $IQR = Q3 - Q1$.

При анализе скорости передачи для замеров использовался модуль JavaScript XMLHttpRequest, предоставляющий количество загруженных байт раз в неравное количество миллисекунд. Из-за маленького промежутка между измерениями и нестабильности сети необработанные данные содержали большое количество выбросов. Для получения более наглядных графиков было применено сглаживание результатов при помощи скользящей средней с окном в 31 измерение.

Результаты исследования

Процедура конфигурирования HTTP/3-сервера. Документация процесса конфигурации тестового стенда является самостоятельной задачей исследования. Для организации доступа к веб-контенту по HTTP/3 необходим сервер с операционной системой и доступ к нему. В исследовании применялся сервер с операционной системой Ubuntu 22.04.5 LTS с удаленным доступом по SSH. В процессе настройки была выявлена ключевая сложность при организации HTTP/3 веб-сервера — необходимость использовать `mainline`¹⁵ — репозиторий `nginx` вместо стандартного.

Стандартный репозиторий Ubuntu 22.04.5 LTS содержит `nginx` версии 1.18, тогда как поддержка HTTP/3 появилась начиная с версии 1.25.0. Для установки актуальной версии необходимо добавить основной репозиторий с последними версиями программного обеспечения в систему, используя команды, показанные на рис. 2.

```
curl https://nginx.org/keys/nginx_signing.key | gpg --dearmor \
  | sudo tee /usr/share/keyrings/nginx-archive-keyring.gpg >/dev/null

echo "deb [signed-by=/usr/share/keyrings/nginx-archive-keyring.gpg] \
http://nginx.org/packages/mainline/ubuntu `lsb_release -cs` nginx" \
  | sudo tee /etc/apt/sources.list.d/nginx.list
```

Рис. 2. Добавление mainline-репозитория nginx в список источников пакетов операционной системы

¹⁵ Основной репозиторий (англ.).

Приведённые инструкции записывают ключ, которым подписываются пакеты из нового репозитория в системное хранилище доверенных ключей: /usr/share/keyrings и добавляют адрес mainline-репозитория nginx в список источников пакетов /etc/apt/sources.list.d с указанием пути к подписи пакетов. После выполнения этих шагов при установке nginx через менеджер пакетов apt будет использоваться репозиторий, содержащий все последние версии сервиса.

Поскольку шифрование встроено в протокол QUIC, наличие сертификата и доменного имени является обязательным требованием при использовании HTTP/3. На предыдущих версиях протокола HTTP шифрование через TLS является отдельным слоем, что добавляет задержку при установлении соединения, но позволяет организовать незащищённый обмен данными. HTTP без шифрования имеет применение в сетях, где шифрование уже обеспечено через Virtual Private Network¹⁶ (VPN). Таким образом, использование HTTP/3 в таких сетях приводит к необходимости настройки сертификатов. На используемом тестовом стенде были выпущены сертификаты от компании Let's Encrypt при помощи программного обеспечения по автоматизации работы с сертификатами — certbot.

Помимо этого, в конфигурационный файл сайта необходимо внести изменения (рис. 3). Ключевыми в конфигурации являются строки 3, 10, 12, 16. Строка 12 содержит инструкцию, разрешающую использование протокола HTTP/3. На строчке 16 указывается заголовок Alt-Svc. При наличии этого заголовка в ответе сервера клиент переходит на использование HTTP/3 (если поддерживается). Поэтому на строчках 2 и 3 указана поддержка стандартных TCP соединений и UDP через QUIC. Впоследствии значение заголовка кэшируется и обмен заголовками по TCP не происходит. Так как QUIC работает на основе TLS версии 1.3, эта версия явно указывается на строчке 10.

```

1  server {
2      listen 443 ssl;
3      listen 443 quic reuseport;
4
5      server_name http3.serafimdev.com;
6
7      ssl_certificate /etc/letsencrypt/live/http3.serafimdev.com/fullchain.pem;
8      ssl_certificate_key /etc/letsencrypt/live/http3.serafimdev.com/privkey.pem;
9
10     ssl_protocols TLSv1.3;
11
12     http3 on;
13     quic_gso on;
14     quic_retry on;
15
16     add_header Alt-Svc 'h3=":443"; ma=86400';
17
18     root /var/www/http3.serafimdev.com;
19     index index.html;
20
21     location / {
22         try_files $uri $uri/ =404;
23     }
24 }
25
26 server {
27     listen 80;
28     server_name http3.serafimdev.com;
29     return 301 https://$host$request_uri;
30 }

```

Рис. 3. Конфигурационный файл nginx для HTTP/3 сайта

TTFB. TTFB — метрика, показывающая, сколько времени проходит от отправки запроса до начала передачи ресурса. Для проведения замеров использовался JavaScript скрипт. Полученные значения приведены в таблице 2.

Таблица 2

Замеры TTFB по разным версиям протокола HTTP

HTTP/1,1, мс	HTTP/2, мс	HTTP/3, мс
20,5	80,3	69,4
28,3	28,4	26,8
38,3	24,4	29,1
27,0	30,4	16,3
41,3	29,1	21,1
24,8	25,7	17,5

¹⁶ Виртуальная частная сеть (англ.).

HTTP/1,1, мс	HTTP/2, мс	HTTP/3, мс
30,1	33,2	18,4
26,7	30,4	23,2
30,9	46,0	22,4
24,7	15,6	23,1
29,2	26,0	24,1
33,3	23,6	19,7
25,9	26,1	24,3
34,7	26,3	23,7
33,3	25,1	23,5
33,3	32,5	25,4
25,9	26,5	26,4
29,4	19,7	22,6
25,0	26,9	24,5
22,7	28,6	15,8

Были получены значения:

- HTTP/1.1: выбросов нет, среднее — 29,27 мс;
- HTTP/2: есть 3 выброса, среднее — 27,23 мс;
- HTTP/3: есть 1 выброс, среднее — 22,52 мс.

$$\mu = \frac{29,27 - 22,52}{29,27} \cdot 100 \% \approx 23,06 \% \quad (5)$$

Согласно расчётам по формуле (5), эксперимент показал, что переход с HTTP/1.1 на HTTP/3 с протоколом QUIC обеспечил сокращение времени до первого байта (TTFB) на 23,06 %.

Время загрузки страницы. Для исследования влияния использования протокола QUIC на скорость загрузки обычной веб-страницы в открытых источниках был найден шаблон страницы, состоящий из 32 файлов, всего 728 килобайт. Полученные значения представлены в таблице 3.

Таблица 3

Время загрузки страницы по разным версиям протокола HTTP

HTTP/1,1, мс	HTTP/2, мс	HTTP/3, мс
1140	1060	781
826	794	699
1160	953	630
726	851	733
731	940	622
757	814	652
746	846	669
815	908	978
791	747	764
834	832	917
709	1060	725
830	868	601
951	744	890
1020	785	643
677	725	906
806	711	739
1100	695	647
743	922	687
775	750	652
739	658	678

Были получены значения:

- HTTP/1.1: есть 3 выброса, среднее — 792,7 мс;
- HTTP/2: выбросов нет, среднее — 833,15 мс;
- HTTP/3: есть 1 выброс, среднее — 717,63 мс.

$$\mu = \frac{792,7 - 717,63}{792,7} \cdot 100 \% \approx 9,5 \% \quad (6)$$

Расчёт по формуле (6) показывает сокращение времени загрузки страницы на 9,5 % при использовании HTTP/3 и QUIC по сравнению с HTTP/1.1 и TCP.

Скорость передачи. Для эксперимента использовался файл размером 3 Гб передача которого осуществлялась по протоколу HTTP/2. Выбор HTTP/2 для данного эксперимента обусловлен методологическими соображениями: целью сравнения являлась изолированная оценка влияния алгоритма контроля перегрузок на профиль скорости передачи, без наложения дополнительных эффектов, вносимых транспортным протоколом. Протокол HTTP/3 (QUIC) реализует собственный стек управления перегрузками поверх UDP, тогда как HTTP/2 использует стандартный TCP-стек ядра операционной системы, в котором переключение между алгоритмами CUBIC и BBR осуществляется непосредственно через параметры ядра Linux без изменения логики протокола прикладного уровня. Было произведено скачивание файла с применением алгоритмов контроля перегрузок CUBIC и BBR. На рис. 4 и 5 приведены начальные фрагменты из графиков скорости загрузки при использовании CUBIC и BBR соответственно.

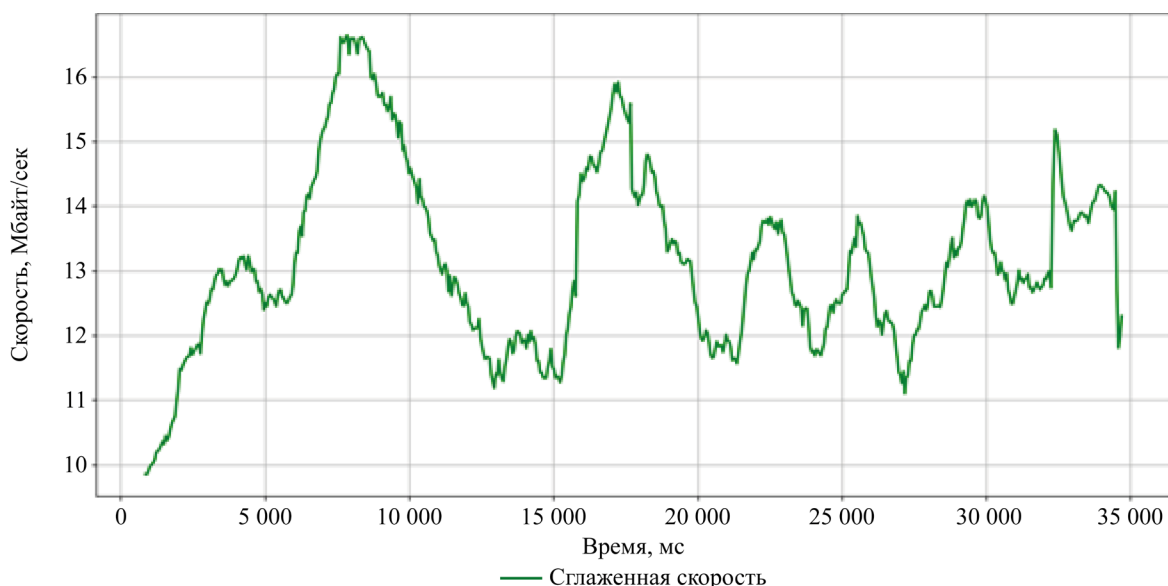


Рис. 4. Скорость скачивания при использовании CUBIC

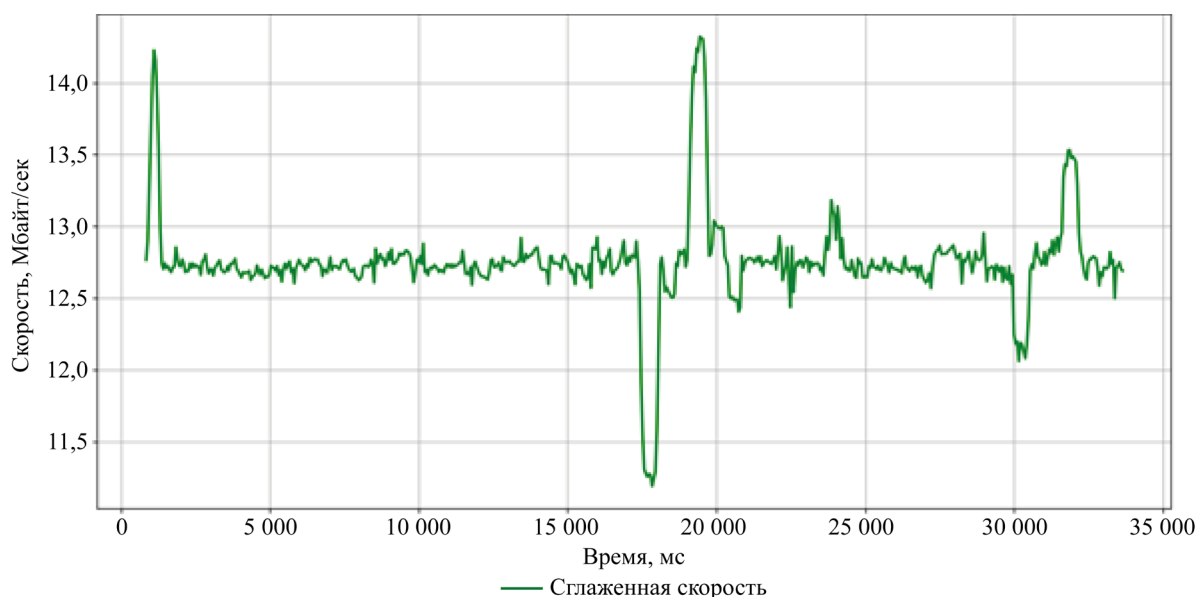


Рис. 5. Скорость скачивания при использовании BBR

При работе алгоритма BBR скорость большую часть времени держится на одном уровне. Средние значения скорости скачивания получились 13,12 МБ/с для CUBIC и 12,75 МБ/с для BBR.

Площадь под кривой графика отражает количество переданной информации и вычисляется по формуле (7). За первые 3 секунды передачи с использованием CUBIC было передано 23,1568 МБ данных, а с использованием BBR — 27,3622 МБ.

$$S = \int_0^{3000} v(t) dt \approx \sum_{i=0}^{3000} \frac{v_i + v_{i+1}}{2} (t_{i+1} - t_i). \quad (7)$$

Обсуждение. Полученные результаты показывают, что практический выигрыш от внедрения HTTP/3 (QUIC) подтверждается экспериментально, однако его величина оказывается существенно ниже теоретически ожидаемой, что требует интерпретации с учётом особенностей сетевой среды, программной реализации и методики измерений.

Сложности конфигурирования и операционные риски. Описанная процедура настройки сопряжена с рядом практических трудностей, которые необходимо учитывать при планировании производственного развёртывания HTTP/3.

Первая сложность связана с невозможностью использования стандартных образов виртуальных машин и контейнеров при автоматизации развёртывания. Большинство официальных образов Ubuntu и популярных контейнерных образов nginx на базе Alpine Linux или Debian включают версию nginx из дистрибутивного репозитория, которая не поддерживает HTTP/3. При использовании таких образов в системах оркестрации (Kubernetes, Docker Compose) каждый узел требует либо ручного добавления mainline-репозитория и переустановки nginx, либо сборки собственного образа с нужной версией. Это усложняет автоматизацию и увеличивает операционные издержки на сопровождение инфраструктуры [17].

Вторая сложность обусловлена механизмом согласования протокола через заголовок Alt-Svc. Первое соединение клиента с сервером всегда устанавливается по TCP (HTTP/1.1 или HTTP/2), и лишь получив в ответе заголовки Alt-Svc, браузер переключается на QUIC при последующих запросах. Если между клиентом и сервером присутствует промежуточный узел — балансировщик нагрузки, обратный прокси или CDN-узел — который не поддерживает QUIC или блокирует UDP-трафик на порту 443, заголовок Alt-Svc либо не доходит до клиента, либо клиент не может установить UDP-соединение. Такое поведение затрудняет диагностику и создаёт риск скрытого отсутствия эффекта от внедрения протокола. Согласно базовой спецификации QUIC [18], при недоступности UDP-транспорта клиент должен откатиться к TCP-соединению без явной сигнализации об ошибке, что делает отсутствие HTTP/3 в реальном трафике трудно диагностируемым без явной инструментальной проверки. Для верификации факта использования HTTP/3 необходима явная проверка через инструменты разработчика браузера или серверные логи с фиксацией версии протокола.

Необходимым условием установления соединения по протоколу HTTP/3 на стороне клиента является наличие браузера с включённой поддержкой QUIC. В браузере Google Chrome поддержка протокола активирована по умолчанию начиная с версии 87, однако в корпоративных средах она может быть отключена групповыми политиками. При отключённой поддержке QUIC браузер не будет устанавливать соединения по HTTP/3 вне зависимости от корректности серверной конфигурации и наличия заголовка Alt-Svc.

Интерпретация результатов TTFB. Объединённое рукопожатие QUIC и TLS 1.3, регламентированное в RFC 9001 [19] и опирающееся на спецификацию TLS 1.3 [20], теоретически сокращает инициализацию до 1 RTT, однако практическая эффективность этого механизма чувствительна к особенностям реализации криптографического стека на конкретном оборудовании и в конкретной версии программного обеспечения. Снижение TTFB на 23,06 % при переходе с HTTP/1.1 на HTTP/3 экспериментально подтверждает преимущество объединённого QUIC-рукопожатия, устраняющего дополнительный RTT, характерный для отдельной инициализации TCP и TLS. Вместе с тем измеренный прирост существенно уступает теоретически ожидаемому значению 71,43 %, что объясняется совокупностью факторов.

Обработка UDP-пакетов на промежуточном сетевом оборудовании провайдера зачастую менее оптимизирована по сравнению с TCP-трафиком: маршрутизаторы и межсетевые экраны традиционно настроены под TCP-профиль нагрузки, а часть операторов применяет дополнительную инспекцию или троттлинг UDP-потоков [8, 11]. Реализации QUIC в nginx и Google Chrome на момент проведения эксперимента сохраняют экспериментальный статус, что проявляется в неоптимальных значениях параметров стека и дополнительных издержках на уровне приложения. Мобильный канал 4G вносит нестабильную переменную составляющую задержки, которая нивелирует часть выигрыша от сокращения числа RTT при установлении соединения. Аналогичное расхождение между теорией и практикой зафиксировано в масштабном развёртывании QUIC компанией Google, где реальное снижение задержки поиска составило 8,0 % для настольных и 3,6 % для мобильных пользователей вместо теоретически ожидаемых значений [8], а также подтверждено в отечественных исследованиях реальных сетевых условий [11]. Полученный результат согласуется и с данными компании ITSumma¹⁷, зафиксировавшей снижение TTFB на 12,4 %, что в совокупности свидетельствует о системном характере разрыва между теоретической и практической эффективностью протокола на текущем этапе его развития.

¹⁷ ITsumma. HTTP/3 и QUIC: будущее быстрого интернета. Хабр. URL: <https://habr.com/ru/companies/itsumma/articles/497520> (дата обращения: 11.02.2026)

Интерпретация времени загрузки страницы. Ускорение полной загрузки тестовой страницы на 9,5 % при использовании HTTP/3 по сравнению с HTTP/1.1 объясняется прежде всего мультиплексированием запросов в рамках одного QUIC-соединения и устранением Head-of-Line¹⁸ блокировки на транспортном уровне. При загрузке тестовой страницы, состоящей из 32 файлов, HTTP/3 параллельно обрабатывает все запросы без взаимной блокировки потоков, тогда как HTTP/1.1 ограничен числом параллельных TCP-соединений.

Примечательна аномалия в результатах HTTP/2: его среднее время загрузки (833,15 мс) превысило аналогичный показатель HTTP/1.1 (792,7 мс). Данный эффект является артефактом применённой методологии статистической обработки, а не показателем реальной неэффективности протокола. В выборке HTTP/1.1 метод межквартильного размаха исключил три значения, превышающих верхнюю границу, что существенно снизило итоговое среднее. Средние значения времени загрузки для HTTP/1.1 и HTTP/2 по всем двадцати измерениям без удаления выбросов составляют 843,8 мс и 833,15 мс соответственно, что подтверждает большую эффективность HTTP/2 в скорости загрузки по сравнению с HTTP/1.1. В данных HTTP/2 выбросы по верхней границе отсутствовали, это означает, что протокол обеспечил более равномерное распределение времён отклика за счёт мультиплексирования запросов и приоритизации потоков в рамках одного TCP-соединения. Таким образом, сравнение очищенных средних некорректно отражает реальное соотношение протоколов: HTTP/2 демонстрирует более высокую стабильность и меньшую вариативность, тогда как итоговое среднее значение после удаления выбросов оказалось статистически ниже у HTTP/1.1.

Интерпретация CUBIC и BBR. Средние скорости передачи файла объёмом 3 ГБ при использовании CUBIC (13,12 МБ/с) и BBR (12,75 МБ/с) оказались сопоставимы: разница в 3 % находится в пределах погрешности измерений при нестабильном мобильном канале. Данный результат предсказуем для длительной передачи одного файла: на протяжении сотен секунд оба алгоритма достигают стационарного режима загрузки канала, и различия в стратегии инициализации перестают определять итоговую среднюю скорость.

Принципиальное различие между алгоритмами проявляется в профиле передачи. CUBIC демонстрирует характерный пилообразный профиль скорости (рис. 4): она монотонно возрастает от стартовых значений менее 10 МБ/с до рабочего уровня примерно за четыре секунды, после чего циклически снижается в моменты потерь пакетов. BBR, использующий оценку пропускной способности Bandwidth-Delay Product¹⁹ (BDP), с первых секунд удерживает скорость на стабильном уровне.

При работе с WWW большая часть запрашиваемых файлов имеют небольшой размер. Предположим, что размер одного файла с ресурсами для веб-страницы составляет 63 КБ, начальный размер окна для медленного старта — 10 килобайт (настройка по умолчанию в Linux-системах), максимальный размер окна — 64 КБ. При медленном старте в алгоритме CUBIC для увеличения окна перегрузки используется экспонента [21].

$$A = \left[\log_2 \frac{cwnd_{max}}{cwnd_0} \right] = \left[\log_2 \frac{64}{10} \right] = 3. \quad (8)$$

Результат вычислений по формуле (8) свидетельствует о том, что для передачи файла необходимо увеличить размер окна перегрузки в три раза, на что потребуется 3 RTT. Если бы передача с самого начала велась с окном перегрузки равным 64, то можно было бы провести передачу за 1 RTT.

Именно этот стартовый период определяет прикладную значимость BBR для веб-сервисов. Типичный ресурс страницы — скрипт, таблица стилей, шрифт — передаётся за одно-два RTT и укладывается в фазу медленного старта CUBIC, в течение которой алгоритм ещё не вышел на рабочее окно перегрузки. BBR в этом сценарии обеспечивает немедленный выход на оптимальную скорость, что суммарно сокращает время параллельной загрузки множества мелких ресурсов. Таким образом, преимущество BBR перед CUBIC реализуется не на длинных передачах, а при загрузке ресурсов страницы, сопровождающейся множественными короткими запросами сразу после установления соединения.

Количественным подтверждением преимущества BBR в начальной фазе передачи служит сравнение площадей под кривыми графиков скорости, вычисленных по формуле (7) методом трапеций. За первые три секунды передачи алгоритм CUBIC обеспечил передачу 23,16 МБ данных, тогда как BBR — 27,36 МБ, что на 18,2 % больше. Данный результат согласуется с результатами экспериментов в работе [15], где была зафиксирована более высокая пропускная способность BBR при высоких значениях RTT, характерных в том числе для межконтинентальных соединений.

Перспективным направлением дальнейших исследований является экспериментальная проверка преимущества BBR непосредственно в веб-сценарии: измерение времени полной загрузки страницы, состоящей из множества небольших ресурсов, при использовании алгоритмов CUBIC и BBR в сочетании с каждой из версий протокола HTTP. Подобный эксперимент позволит количественно оценить, в какой мере ускоренный выход BBR на рабочую скорость транслируется в сокращение времени загрузки страницы в реальном веб-сценарии, а также определить, при каких сочетаниях версии протокола и алгоритма управления перегрузками прикладной эффект проявляется наиболее отчетливо.

¹⁸ Блокировка начала очереди (англ.).

¹⁹ Произведение пропускной способности сети на время задержки (англ.).

Ограничения исследования и практические рекомендации. Полученные результаты обладают практической ценностью для оценки выгоды перехода на HTTP/3, однако ряд ограничений экспериментального стенда сужает область применимости выводов.

Конфигурация стенда включала единственную виртуальную машину с 1 vCPU и единственного клиента, подключённого через мобильный канал 4G. Мобильный канал приносит нестабильную переменную задержку и непостоянную полосу пропускания, что увеличивает разброс замеров и затрудняет изоляцию эффекта протокола от эффекта канала. Производительность транспортных протоколов существенно зависит от сетевой топологии, значений RTT, уровня потерь пакетов и политик промежуточного оборудования, поэтому перенос результатов на иные сетевые сценарии требует самостоятельной экспериментальной проверки [22, 23].

Малый объём выборки (20 замеров на протокол) обеспечивает достаточную точность для первичной оценки, но недостаточен для построения статистически устойчивых доверительных интервалов. Отсутствие географически распределённых клиентов не позволяет оценить влияние высоких RTT — условий, при которых преимущество QUIC теоретически наиболее выражено.

На основании полученных данных можно сформулировать следующие практические рекомендации. Переход на HTTP/3 целесообразен прежде всего для сервисов с большим числом небольших ресурсов на странице, аудиторией с высокими задержками (мобильные пользователи, удалённые регионы) и требованиями к минимизации TTFB. Для сервисов с преобладающей передачей крупных файлов через стабильные проводные соединения практический выигрыш от перехода будет минимальным. Алгоритм BBR рекомендуется к включению совместно с HTTP/3: при сопоставимой средней скорости на длинных передачах он обеспечивает стабильный профиль и сокращает время выхода на рабочую скорость, что критично именно в веб-сценарии множественных коротких запросов.

Для повышения достоверности оценки производительности в последующих исследованиях обосновано сравнение альтернативных серверных реализаций QUIC (помимо nginx), а также анализ влияния прокси-серверов на метрики производительности при использовании QUIC [10].

Заключение. Проведённое исследование подтвердило, что внедрение протокола QUIC даёт практический выигрыш в скорости веб-взаимодействий. Таким образом, было получено сокращение метрики TTFB на 23,06 % и снижение времени загрузки тестовой веб-страницы на 9,5 %. Приведённая в статье модель прогнозирует снижение TTFB не на 23,06 %, а на 71,43 %. Такое расхождение показывает сильное влияние экспериментального статуса протокола на его распространённость на сетевом оборудовании и критичность иных факторов, рассмотренных в статье, для полномасштабного внедрения протокола.

В работе проведено сравнение алгоритмов контроля перегрузок CUBIC (стандартный) и BBR (наиболее распространённый в HTTP/3), а также представлено теоретическое обоснование преимущества BBR при передаче мало-размерных файлов, обусловленного более высокой начальной скоростью и отсутствием механизма медленного старта. Аналогичные достоинства BBR зафиксированы и в зарубежных исследованиях. В частности, в статье [15] отмечается эффективность данного алгоритма в каналах с большим RTT (межконтинентальные соединения) благодаря моделированию пропускной способности канала связи.

Протокол QUIC в сочетании с HTTP/3 на текущем этапе развития сопряжён с определёнными сложностями внедрения, однако обладает значительным потенциалом для построения высокопроизводительных информационных систем, что подтверждается результатами других исследований [24], в том числе применительно к системам с требованиями к надёжной доставке трафика реального времени [25].

Процесс настройки HTTP/3-сервера требует загрузки дополнительных модулей в ядро операционной системы. Это негативно сказывается на распространённости протокола, однако при наличии в организации достаточного количества квалифицированных специалистов для поддержки подобной инфраструктуры переход на HTTP/3 способен обеспечить ощутимые преимущества. Выигрыш по TTFB и отсутствие Head-of-Line блокировок теоретически позволят существенно ускорить загрузку ресурсов страницы. Особенно заметным прирост производительности может оказаться на страницах, содержащих множество небольших ресурсов.

Помимо вопросов производительности, переход на QUIC и HTTP/3 порождает специфические вызовы для инфраструктуры информационной безопасности: встроенное шифрование затрудняет глубокую инспекцию пакетов (DPI) и функционирование систем обнаружения вторжений, что детально рассмотрено в [26] и требует отдельного учёта при планировании производственного внедрения.

Ограничения исследования включают упрощённую конфигурацию тестового стенда (одна виртуальная машина и мобильный 4G-канал), а также небольшую выборку замеров. Полученные результаты обладают прикладной ценностью для оценки целесообразности перехода на HTTP/3, однако нуждаются в подтверждении на более широком спектре сценариев, поскольку производительность транспортных протоколов существенно зависит от сетевой топологии, задержек и потерь. Тема алгоритмов контроля перегрузок может быть раскрыта подробнее в последующих публикациях — в частности, представляется целесообразным сопоставление различных алгоритмов в сочетании с разными версиями протокола HTTP. В современных информационных системах широко применяются прокси-серверы для управления трафиком; перспективным направлением является исследование влияния подобных промежуточных узлов на метрики производительности при использовании QUIC [10].

Список литературы / References

1. Горохова П.А. Российский рынок рекламы: состояние, структура, тенденции и перспективы развития. *Государственное и муниципальное управление. Ученые записки*. 2020;(1):297–302. <https://doi.org/10.22394/2079-1690-2020-1-1-297-302>
- Gorokhova PA. Russian Advertising Market: State, Structure, Trends and Development Prospects. *State and Municipal Management. Scholar Notes*. 2020;(1):297–302. <https://doi.org/10.22394/2079-1690-2020-1-1-297-302>
2. Arapakis I, Park S, Pielot M. Impact of Response Latency on User Behaviour in Mobile Web Search. In: *Proc. ACM SIGIR Conference on Human Information Interaction and Retrieval (CHIIR '21)*. Canberra, Australia: ACM; 2021. P. 279–283. <https://doi.org/10.1145/3406522.3446038>
3. Рахмани Д., Баранов М.Д., Кузьмин Д.А. Разработка метода оптимизации веб-приложений с целью повышения производительности. *International Journal of Humanities and Natural Sciences*. 2025;102(3–1):237–241. <https://doi.org/10.24412/2500-1000-2025-3-1-237-241>
- Rahmani J, Baranov MD, Kuzmin DA. Development of a Web Application Optimization Method to Improve Performance. *International Journal of Humanities and Natural Sciences*. 2025;102(3–1):237–241. <https://doi.org/10.24412/2500-1000-2025-3-1-237-241>
4. Wendroth J, Jaeger B. A Brief Overview on HTTP. In: *Proc. Seminar on Innovative Internet Technologies and Mobile Communications (ИИТМ)*. Munich: Technical University of Munich; 2022. P. 59–69. https://doi.org/10.2313/NET-2022-11-1_11
5. Рахмани Д., Рогов И.Д. Тенденции развития сетевых технологий в 2022 году. В: *Труды XVI Международной отраслевой научно-технической конференции «Технологии информационного общества», Москва, 02–03 марта 2022 года*. Москва; Издательский дом Медиа паблшер. 2022. С. 30–31.
- Rahmani J, Rogov ID. Trends in the Development of Network Technologies in 2022. In: *Proc. XVI International Industry Scientific and Technical Conference*. Moscow: Izdatel'skii dom Media publisher; 2022. P. 30–31. (In Russ.)
6. Bishop M (ed). *HTTP/3. RFC 9114*. AMS LLC: RFC Editor; 2022. <https://doi.org/10.17487/RFC9114>
7. Amet M, Thomas L, Ye-Qiong Song. A Performance Evaluation of QUIC in Real-Time Networks. In: *Proc. 32nd International Conference on Real-Time Networks and Systems (RTNS 2024)*. New York, NY: ACM; 2024. P. 255–265. <https://doi.org/10.1145/3696355.3699698>
8. Langley A, Riddoch A, Wilk A, Vicente A, Krasic C, Zhang D, et al. The QUIC Transport Protocol: Design and Internet-Scale Deployment. In: *Proc. ACM SIGCOMM Conference*. New York, NY: ACM; 2017. P. 183–196. <https://doi.org/10.1145/3098822.3098842>
9. Fan Liu, Crowley P. Security and Performance Characteristics of QUIC and HTTP/3. In: *Proc. 10th ACM Conference on Information-Centric*. New York, NY: ACM; 2023. p. 124–126. <https://doi.org/10.1145/3623565.3623757>
10. Fan Liu, Farkiani B, Dehart J, Parwatikar J, Crowley P. Performance Comparison of HTTP/3 and HTTP/2 with Proxy Integration. *arXiv preprint*. 2024. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2409.16267>
11. Андреянов Н.С., Рябиков А.Ю. Исследование клиент-серверных протоколов для повышения отказоустойчивости и безопасности соединения. *International Journal of Humanities and Natural Sciences*. 2024;97(10–1):128–132. <https://doi.org/10.24412/2500-1000-2024-10-1-128-132>
- Andreyanov NS, Ryabikov AY. Research on Client-Server Protocols to Improve Fault Tolerance and Connection Security. *International Journal of Humanities and Natural Sciences*. 2024;97(10–1):128–132. <https://doi.org/10.24412/2500-1000-2024-10-1-128-132>
12. Смирнов И.А., Михайлов М.Ю., Лаптева М.Г. HTTP/3 и протокол QUIC: будущее высокопроизводительных веб-сервисов. *Вестник науки*. 2025;2(6):1780–1788.
- Smirnov IA, Mikhailov MYu, Lapteva MG. HTTP/3 and the QUIC Protocol: Future of High-Performance Web Services. *Vestnik Nauki*. 2025;2(6):1780–1788.
13. Jia Zhang, Haixuan Tong, Enhuan Dong, Xin Qian, Mingwei Xu, Xiaotian Li, et al. Cold Start or Hot Start? Robust Slow Start in Congestion Control with A Priori Knowledge for Mobile Web Services. In: *Proc. ACM Web Conference*. New York, NY: ACM; 2024. P. 2870–2878. <https://doi.org/10.1145/3589334.3645393>
14. Cardwell N, Yuchung Cheng, Gunn CS, Hassas Yeganeh S, Jacobson V. BBR: Congestion-Based Congestion Control. *Communications of the ACM*. 2017;60(2):58–66. <https://doi.org/10.1145/3009824>
15. Yi Han, Mengjie Zuo, Huijun Yuan, Yi Zhong, Zhenhui Yuan, Ting Bi. A QoS-Based Fairness-Aware BBR Congestion Control Algorithm Using QUIC. *Mathematical Problems in Engineering*. 2022;2022:7222030. <https://doi.org/10.1155/2022/7222030>
16. Dierks T, Rescorla E. The Transport Layer Security (TLS) Protocol Version 1.2. *RFC 5246*. New York: IETF; 2008. 101 p. <https://doi.org/10.17487/RFC5246>
17. Voronova AG. Typification of Projects for the Transition to Cloud Services. *Advanced Engineering Research (Rostov-on-Don)*. 2024;24(3):274–282. <https://doi.org/10.23947/2687-1653-2024-24-3-274-282>
18. Iyengar J, Thomson M (eds). *QUIC: A UDP-Based Multiplexed and Secure Transport. RFC 9000*. AMS LLC: RFC Editor; 2021. <https://doi.org/10.17487/RFC9000>
19. Thomson M, Turner S (eds). *Using TLS to Secure QUIC. RFC 9001*. AMS LLC: RFC Editor; 2021. <https://doi.org/10.17487/RFC9001>

20. Rescorla E. *The Transport Layer Security (TLS) Protocol Version 1.3. RFC 8446*. New York, NY: IETF; 2018. <https://doi.org/10.17487/RFC8446>
21. Rhee I, Xu L, Ha S, Zimmermann A, Eggert L, Scheffenegger R. *CUBIC for Fast and Long-Distance Networks. RFC 8312*. AMS LLC: RFC Editor; 2018. <https://doi.org/10.17487/RFC8312>
22. Linets G.I., Voronkin R.A., Slyusarev G.V., Govorova S.V. Optimization Problem for Probabilistic Time Intervals of Quasi-Deterministic Output and Self-Similar Input Data Packet Flow in Telecommunication Networks. *Advanced Engineering Research (Rostov-on-Don)*. 2024;24(4):424-432. <https://doi.org/10.23947/2687-1653-2024-24-4-424-432>
23. Samoylenko V.V. Concept of a Multilevel Network Infrastructure for Monitoring Agricultural Facilities Based on Wireless Sensor Networks. *Advanced Engineering Research (Rostov-on-Don)*. 2025;25(4):371-382. <https://doi.org/10.23947/2687-1653-2025-25-4-2238>
24. Gupta A, Bartos R. Improving Web Content Delivery with HTTP/3 and Non-Incremental EPS. In: *Proc. Conference on Networking and Internet Architecture*. Durham, NH: University of New Hampshire; 2024. P. 1–10. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2404.13460>
25. Антонова В.М., Бужин И.Г., Гречишкина Н.А., Корочкин Е.Д., Кузнецов Н.А. Транспортный протокол QUIC как способ надёжной передачи трафика реального времени. *Информационные процессы*. 2025;25(3):490–500. https://doi.org/10.53921/18195822_2025_25_3_490
- Antonova VM, Buzhin IG, Grechishkina NA, Korochkin ED, Kuznetsov NA. QUIC Transport Protocol as Reliable Transmission Method for Real-Time Traffic. *Information Processes*. 2025;25(3):490–500. https://doi.org/10.53921/18195822_2025_25_3_490
26. Селиванов М.А. Сетевые протоколы нового поколения и их анализ с точки зрения информационной безопасности. *Молодой исследователь Дона*. 2022;(1(34):56–62.
- Selivanov MA. New Generation Network Protocols and Their Analysis from the Point of View of Information Security. *Young Researcher of the Don*. 2022;(1):56–62.

Об авторах:

Джахед Рахмани, старший преподаватель кафедры «Сетевые информационные технологии и сервисы» Московского технического университета связи и информатики (111024, Российская Федерация, г. Москва, ул. Авиамоторная, 8 а), [SPIN-код](#), [ORCID](#), j.rahmani@mtuci.ru

Серафим Павлович Сухарев, техник НИО «Центр искусственного интеллекта и перспективных проектов» Московского технического университета связи и информатики (111024, Российская Федерация, г. Москва, ул. Авиамоторная, 8 а), [SPIN-код](#), [ORCID](#), [ResearchGate](#), [ResearcherID](#), s.p.suharev@mtuci.ru

Заявленный вклад авторов:

Д. Рахмани: разработка концепции и методологии, научное руководство, написание рукописи, редактирование.

С.П. Сухарев: курирование данных, формальный анализ, проведение исследования, разработка программного обеспечения, визуализация, написание черновика рукописи.

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

About the Authors:

Jahed Rahmani, Senior Lecturer of the Department of Network Information Technologies and Services, Moscow Technical University of Communications and Informatics (8a, Aviamotornaya Str., Moscow, 111024, Russian Federation), [SPIN-code](#), [ORCID](#), j.rahmani@mtuci.ru

Serafim P. Sukharev, Technician of the Research and Innovation Department “Center for Artificial Intelligence and Advanced Projects”, Moscow Technical University of Communications and Informatics (8a, Aviamotornaya Str., Moscow, 111024, Russian Federation), [SPIN-code](#), [ORCID](#), [ResearchGate](#), [ResearcherID](#), s.p.suharev@mtuci.ru

Claimed Contributorship:

J Rahmani: conceptualization, methodology, supervision, writing & editing.

SP Sukharev: data curation, formal analysis, investigation, software, visualization, writing – original draft preparation.

Conflict of Interest Statement: the authors declare no conflict of interest.

All authors have read and approved the final version of manuscript.

Поступила в редакцию / Received 02.03.2026

Поступила после рецензирования / Reviewed 02.04.2026

Принята к публикации / Accepted 09.04.2026

ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ INFORMATION TECHNOLOGY, COMPUTER SCIENCE AND MANAGEMENT



УДК 681.5:004.942

Оригинальное эмпирическое исследование

<https://doi.org/10.23947/2687-1653-2026-26-2-2237>

Способ оценки состояния кожухотрубчатых теплообменников с применением машинного обучения для повышения энергоэффективности



EDN: JTINTA

Л.Г. Тугашова¹ , А.В. Затонский² 

¹ Альметьевский государственный технологический университет «Высшая школа нефти», г. Альметьевск, Российская Федерация

² Пермский национальный исследовательский политехнический университет, г. Пермь, Российская Федерация

✉ tugashova@yandex.ru

Аннотация

Введение. Кожухотрубчатые теплообменники широко применяются на установках подготовки и переработки нефти, а также в системах теплоснабжения, где их надежная работа во многом определяется интенсивностью термического загрязнения поверхности труб. В связи с этим актуальной задачей является своевременное определение момента, когда теплообменному оборудованию требуется техническое обслуживание, поскольку накопление отложений приводит к снижению эффективности теплопередачи и росту эксплуатационных затрат. Анализ литературных источников показывает, что проблема прогнозирования загрязнения теплообменных аппаратов достаточно активно исследуется. Однако существующие подходы, ориентированные на учет режимных параметров и физико-химических свойств теплоносителей, не всегда применимы к специфическим условиям нефтепереработки, где состав сырья, режимы эксплуатации и характер отложений существенно отличаются от типовых промышленных процессов. Таким образом, сохраняется пробел в научных знаниях, связанный с недостаточной разработанностью моделей, позволяющих надежно описывать изменение термического сопротивления загрязнений и коэффициента теплопередачи именно для кожухотрубчатых теплообменников нефтеперерабатывающих установок. Целью настоящего исследования является определение зависимости коэффициентов термического сопротивления загрязнений и теплопередачи от режимных параметров — в частности, от выходных температур теплоносителей и плотности нефти. Для достижения поставленной цели предполагается применение методов машинного обучения, позволяющих построить более адекватные прогностические модели и тем самым повысить обоснованность решений по техническому обслуживанию теплообменного оборудования.

Материалы и методы. В качестве объекта исследования рассмотрен кожухотрубчатый теплообменник установки переработки нефти малой мощности, в котором циркуляционное орошение дизельного топлива (210–235 °С) выступает горячим теплоносителем в межтрубном пространстве, а нефть — холодным теплоносителем в трубном пучке. Для расчета определялись площади сечений трубного и межтрубного пространств, линейные скорости потоков, критерии Рейнольдса, Прандтля и Нуссельта, а также коэффициенты теплоотдачи со стороны горячего и холодного теплоносителей. Коэффициент теплопередачи рассчитывался с учетом термического сопротивления стенки и загрязнений, теплообмен — по уравнениям теплового баланса и теплопередачи. Для оценки термического сопротивления загрязнений и коэффициента теплопередачи использовались методы машинного обучения и символьной регрессии, в том числе PySR, SISSO, FROLS и CatBoostRegressor, на основе данных о плотности нефти и температуре теплоносителей. Поверочный расчет теплообменника выполнен методом последовательных приближений с решением системы нелинейных уравнений в Matlab.

Результаты исследования. Поверочный расчёт кожухотрубчатого теплообменника для нефти трёх месторождений показал, что при росте термического сопротивления загрязнений от 0 до $0,002 \text{ (м}^2 \cdot \text{°C)/Вт}$ коэффициент теплопередачи снижается примерно с 93–95 до 81–83 $\text{Вт/(м}^2 \cdot \text{°C)}$. Установлено, что изменение выходных температур теплоносителей служит информационной основой для идентификации загрязнений. Методами символьной регрессии SISSO и PySR получены аналитические зависимости термического сопротивления от плотности нефти и выходных температур с RMSE $1,25 \cdot 10^{-8}$ и $2,34 \cdot 10^{-8} \text{ (м}^2 \cdot \text{°C)/Вт}$ соответственно. Для прогнозирования динамики теплопередачи построены NARX-модели на базе FROLS и CatBoostRegressor, валидированные на промышленных данных. Ошибка постпрогноза для алгоритма CatBoostRegressor RMSE = $0,03573 \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{°C)}$, для алгоритма FROLS RMSE = $0,01296 \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{°C)}$.

Обсуждение. Снижение коэффициента теплопередачи на 13 % при росте термического сопротивления загрязнений до $0,002 \text{ (м}^2 \cdot \text{°C)/Вт}$ согласуется с теоретическими моделями и экспериментальными данными других исследователей. Применение методов SISSO и PySR обеспечило существенно более высокую точность по сравнению с нейросетевыми подходами при малых обучающих выборках. Алгоритм FROLS превзошёл CatBoostRegressor по точности постпрогноза динамики коэффициента теплопередачи, что объясняется компактностью полиномиальной модели и гладким характером исследуемого процесса. Установленный порог снижения коэффициента теплопередачи на 25 % соответствует отраслевым нормам и обеспечивает переход к обслуживанию оборудования по фактическому состоянию.

Заключение. Разработана методика определения термического сопротивления загрязнений теплообменника по выходной температуре теплоносителей и плотности нефти. Методами символьной регрессии SISSO и PySR получены аналитические зависимости с RMSE $1,25 \cdot 10^{-8} \text{ (м}^2 \cdot \text{°C)/Вт}$ и $2,34 \cdot 10^{-8} \text{ (м}^2 \cdot \text{°C)/Вт}$. Построены NARX-модели прогнозирования коэффициента теплопередачи (RMSE $0,01296$ и $0,03573 \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{°C)}$), валидированные на промышленных данных. Снижение коэффициента теплопередачи на 25,2 % принято критерием необходимости очистки аппарата, что обеспечивает переход к обслуживанию по фактическому состоянию и повышение энергоэффективности нефтепереработки.

Ключевые слова: кожухотрубчатый теплообменник, термическое сопротивление, коэффициент теплопередачи, символьная регрессия

Благодарности. Авторы выражают благодарность редакции и рецензентам за уделенное время и ценные комментарии.

Для цитирования. Тугашова Л.Г., Затонский А.В. Способ оценки состояния кожухотрубчатых теплообменников с применением машинного обучения для повышения энергоэффективности. *Advanced Engineering Research (Rostov-on-Don)*. 2026;26(2):2237. <https://doi.org/10.23947/2687-1653-2026-26-2-2237>

Original Empirical Research

Machine Learning-Based Condition Assessment Method for Shell-and-Tube Heat Exchangers to Improve Energy Efficiency

Larisa G. Tugashova¹  , Andrey V. Zatonkiy² 

¹ State Technological University “Higher School of Petroleum”, Almetyevsk, Russian Federation

² Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russian Federation

✉ tugashova@yandex.ru

Abstract

Introduction. Shell-and-tube heat exchangers are widely used in oil treatment and refining plants, as well as in heating systems, where their reliable operation is largely determined by the intensity of thermal fouling on the tube surface. Therefore, it is crucial to promptly determine when heat exchange equipment requires maintenance, as deposit accumulation can result in the reduced heat transfer efficiency and increased operating costs. A review of the literature shows that the problem of predicting heat exchanger fouling is being actively researched. However, existing approaches, which focus on process parameters and the physicochemical properties of heat transfer fluids, are not always applicable to the specific conditions of oil refining, where feedstock composition, operating conditions, and deposit nature differ significantly from typical industrial processes. Thus, there remains a gap in scientific knowledge associated with the insufficient development of models that allow for the reliable description of changes in the thermal resistance of contaminants, and the heat transfer coefficient specifically for shell-and-tube heat exchangers of oil refineries. The objective of this study is to determine the dependence of the coefficients of thermal resistance of contaminants and heat transfer on operating parameters, in particular, on the output temperatures of coolants and oil density. For this, it is planned to use machine learning methods to build more adequate predictive models and thereby increase the validity of decisions on the maintenance of heat exchange equipment.

Materials and Methods. A shell-and-tube heat exchanger in a small refinery unit was investigated. Here, circulating diesel reflux (210–235 °C) was the hot medium on the shell side, and oil was the cold medium in the tube bundle. For the calculation, the cross-sectional areas of the tube and annular spaces, linear flow rates, Reynolds, Prandtl, and Nusselt criteria, as well as the heat transfer coefficients of the hot and cold coolants were determined. The heat transfer coefficient was calculated taking into account the thermal resistance of the wall and contaminants, while heat transfer was calculated from heat balance and heat transfer equations. Machine learning and symbolic regression methods, including PySR, SISO, FROLS, and CatBoostRegressor, were used to estimate the thermal resistance of contaminants and the heat transfer coefficient, based on oil density and coolant temperature data. The verification calculation of the heat exchanger was performed by the method of successive approximations with the solution to a system of nonlinear equations in Matlab.

Results. A verification calculation of a shell-and-tube heat exchanger for oil from three fields showed that with an increase in the thermal resistance of contaminants from 0 to 0.002 (m²·°C)/W, the heat transfer coefficient decreased from approximately 93–95 to 81–83 W/(m²·°C). It was established that changes in the outlet temperatures of the coolants was an information basis for identifying contaminants. Using the SISO and PySR symbolic regression methods, analytical dependences of thermal resistance on oil density and outlet temperatures were obtained with RMSE 1.25·10⁻⁸ and 2.34·10⁻⁸ (m²·°C)/W, respectively. To predict the dynamics of heat transfer, NARX models based on FROLS and CatBoostRegressor were built, validated on industrial data. Ex-post forecast error for the algorithm CatBoostRegressor RMSE = 0.03573 W/(m²·°C), for the algorithm FROLS RMSE = 0.01296 W/(m²·°C).

Discussion. A 13% reduction in heat transfer coefficient with an increase in contaminant thermal resistance to 0.002 (m²·°C)/W was consistent with theoretical models and experimental data from other researchers. The use of SISO and PySR methods provided significantly higher accuracy compared to neural network approaches with small training sets. The FROLS algorithm outperformed CatBoostRegressor in the accuracy of ex-post forecast of heat transfer coefficient dynamics, which is explained by the compactness of the polynomial model and the smooth nature of the process under study. The established threshold for reducing the heat transfer coefficient by 25% complies with industry standards and provides the transition to equipment maintenance based on actual condition.

Conclusions. A method for determining the thermal resistance of heat exchanger fouling based on the outlet temperature of the coolant and the oil density was developed. Analytical relationships with RMSE 1.25·10⁻⁸ (m²·°C)/W and 2.34·10⁻⁸ (m²·°C)/W were obtained using the SISO and PySR symbolic regression methods. NARX models for predicting heat transfer coefficients (RMSE 0.01296 and 0.03573 W/(m²·°C)) were built and validated using industrial data. A 25.2% reduction in heat transfer coefficient was adopted as the criterion for the need for cleaning the unit, which provided a transition to condition-based maintenance and increased energy efficiency in oil refining.

Keywords: shell-and-tube heat exchanger, thermal resistance, heat transfer coefficient, symbolic regression

Acknowledgements. The authors would like to thank the editors and reviewers for their time and valuable comments.

For Citation. Tugashova LG, Zatonkiy AV. Machine Learning-Based Condition Assessment Method for Shell-and-Tube Heat Exchangers to Improve Energy Efficiency. *Advanced Engineering Research (Rostov-on-Don)*. 2026;26(2):2237. <https://doi.org/10.23947/2687-1653-2026-26-2-2237>

Введение. Повышение энергоэффективности процессов подготовки и переработки нефти является актуальной и практически значимой проблемой, особенно в условиях ужесточения требований к энергоэффективности и к снижению себестоимости различного рода производств при ограничениях на сбыт нефти и нефтепродуктов за рубежом, введенных в последнее время. Производители нефти не могут влиять на эти ограничения, но могут совершенствовать внутренние процессы на предприятиях с целью снижения себестоимости производства. В качестве конкретных возможностей очевидны снижение теплотерь, расхода тепловой энергии, повышение коэффициента полезного действия установок. Последнее возможно как за счет обеспечения регламентируемой температуры процесса, так и за счет диагностики оборудования для снижения вероятностей внеплановых простоев. Эти подходы тесно связаны с процессами теплообмена, имеющими большое значение в нефтехимии. Слой отложений загрязнений на поверхностях труб в 1–3 мм может существенно снизить эффективность теплопередачи. При этом ориентировочные потери тепла составляют 20–40 %. Для компенсации снижения теплопередачи и поддержания необходимых параметров процесса следует увеличивать расход теплоносителя, что ведет к росту потребления топлива и электроэнергии. По мнению экспертов, загрязнение теплообменника в 1 мм может привести к перерасходу топлива на 10–15 %.

Однако непосредственное определение состояния кожухотрубчатых теплообменников нефтепродуктов затруднено их рабочими температурами и невозможностью наблюдать внутренние отложения, коррозию или деформацию непосредственно. Поэтому ключевыми параметрами контроля загрязнения стенок труб являются коэффициент теплопередачи, перепад давления, температура теплоносителей на выходе.

Причиной возникновения отложений на поверхностях стенок аппаратов является присутствие в сырье асфальтосмолистых веществ, парафинов, воды, солей. Для избавления от отложений и накипи в полостях нефтепроводов и теплообменников применяются механические, тепловые и химические способы очистки. Очистка теплообменника происходит с помощью промывки его растворителем парафинов. На объектах подготовки и переработки нефти применяется ультразвуковая очистка от парафиновых отложений.

Отложения на стенках труб приводят к ухудшению процесса теплообмена и снижению коэффициента теплопередачи. Существуют различные способы диагностики и оценки слоя загрязнений на поверхности труб теплообменных аппаратов. Например, экспериментально с помощью систем мониторинга определяют характеристики чистого и загрязненного теплообменника. Другой подход связан с построением математических моделей. Примером является модель Эберта-Панчала и ее усовершенствованные варианты.

В статье [1] приведен обзор моделей и примеры количественной оценки толщины отложений накипи в пластинчатых теплообменниках систем теплоснабжения. Авторами [2] выполнен аналитический учет влияния загрязнений на технико-экономические показатели установок промышленной подготовки нефти. В работе экспериментальным методом получены коэффициенты теплопередачи, теплоотдачи, термического сопротивления отложений в теплообменниках. В работах [1, 2] предложенные модели касаются конкретных типов теплообменников и отложений, они не прогнозируют динамику загрязнений.

Для решения задач диагностики теплообменного оборудования широко применяются программные средства, в частности программы технологического моделирования. Например, в работе [3] авторы рассматривают проблему загрязнения теплообменных аппаратов установок гидроочистки дизельного топлива. Задача решается с использованием моделирующей программы Hysys. В исследовании [4] численное решение осуществлено путем построения тепловой модели на основе метода конечных элементов в программе Ansys. В статье [5] авторами предложены упрощенные формулы для расчета показателя эффективной теплопроводности пористых структур с применением Mathcad, Ansys. На сегодня использование вышеприведенных программ не представляется возможным в рамках импортозамещения.

В статье [6] использован программный комплекс «МиР ПиА» для моделирования показателей качества подготовки нефти к транспортировке. Для работы необходимо приобретение лицензии.

Ряд исследований направлен на улучшение конструктивных параметров применяемых в отрасли аппаратов. Улучшение конструкции, совершенствование аэродинамики трубных пучков должны обеспечивать при высокой надежности интенсификацию в них теплообмена. В работе [7] это связывается с перепадами давления в теплообменнике, которые могут привести к сбоям в работе оборудования. Также предложено внедрение алгоритмов автоматической корректировки режимов работы. Авторами статьи [8] предложена нейросетевая модель прогнозирования теплогидравлической эффективности поверхностных интенсификаторов теплообмена. Для нейросетевых моделей необходимы большие объемы обучающих данных по загрязнениям теплообменников, которые сложно собрать. Кроме того, подобные решения, требующие изменения конструкции аппарата, могут быть неприменимы для эксплуатируемого оборудования.

Авторами статьи [9] с помощью методов имитационного моделирования получена модель кожухотрубчатого теплообменника и предложены способы совершенствования системы управления теплообменным аппаратом. Математическая модель кожухотрубчатого испарителя представлена как объект с сосредоточенными параметрами. Составлен тепловой баланс в дифференциальной форме с учетом транспортного запаздывания.

В [10] представлена математическая модель кожухотрубчатого теплообменника в виде ARMAX-модели для участия в системе управления. В этих моделях не учитываются нелинейности.

В функционировании теплообменного оборудования для повышения эффективности тепло- и массообмена большую роль играет коллоидное состояние сырья и продуктов, особенно тяжелых фракций и остатков [11]. Такое решение актуально для тяжелых фракций, а также требует установки дополнительного оборудования.

В результате анализа изученной литературы установлено, что все еще остаются малоисследованными вопросы прогнозирования коэффициентов термического загрязнения и теплопередачи теплообменников с учетом физико-химических свойств сырья, а также применения методов, работающих с малым объемом данных и учитывающих нелинейности. Для аппроксимации и прогнозирования представляется интересным направление комбинирования подходов, например, сочетание физико-химических (балансовых) методов и машинного обучения.

Целью данного исследования является разработка методики определения коэффициента термического сопротивления загрязнений теплообменного аппарата и коэффициента теплопередачи в зависимости от выходных температур нефти и дизельного топлива, от плотности нефти, а также прогнозирование коэффициента теплопередачи.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

- выполнить поверочный тепловой расчет кожухотрубчатого теплообменника установки переработки нефти малой мощности, т. е. получить математическую модель теплообменника в балансовой форме;
- с помощью полученной выше модели кожухотрубчатого теплообменника исследовать влияние физико-химических свойств теплоносителей и коэффициента термического загрязнения на коэффициент теплопередачи и выходные параметры (на примере образцов нефти с различных месторождений);
- получить зависимость коэффициента термического сопротивления загрязнений и коэффициента теплопередачи от выходных температур нефти и дизельного топлива в теплообменниках, а также от плотности нефти, т. е. построить аппроксимирующие зависимости с помощью символьной регрессии;
- используя полученные аппроксимирующие зависимости, экспериментальные данные действующей установки, а также описание объекта в виде ранее полученных обыкновенных дифференциальных уравнений, построить нелинейную динамическую модель, пригодную для прогнозирования коэффициента теплопередачи.

Материалы и методы. Для определения коэффициента термического сопротивления загрязнений и коэффициента теплопередачи в кожухотрубчатых теплообменниках предлагается применить методы машинного обучения, использующие малые объемы выборки, например, символьную регрессию, так как в реальных условиях работы установки сложно получить большие объемы информации по загрязнению теплообменников. Для прогнозирования коэффициента теплопередачи предлагается NARX-модель.

Объектом исследования является кожухотрубчатый теплообменник установки переработки малой мощности. При расчете кожухотрубчатого теплообменника применялись исходные данные по конструктивным параметрам теплообменного аппарата: поверхность теплообмена — 68 м², длина корпуса теплообменника — 7,2 м, длина трубок — 6 м.

Суммарное термическое загрязнение поверхности труб принималось в диапазоне от 0 (чистый теплообменник) до 0,002 (м²·°C)/Вт (загрязненный теплообменник).

Для подобных установок циркуляционное орошение (ЦО) организовано следующим образом. Дизельное топливо с выхода основной колонны разделяется на два потока: продуктовый и циркуляционный. ЦО, проходя через кожухотрубчатый теплообменник, возвращается в основную колонну. Температура ЦО составляет 210–235 °C. Дизельное топливо (межтрубное пространство) является горячим теплоносителем, нефть (трубный пучок) — холодным теплоносителем.

Первый шаг расчета — это вычисление площади сечения трубного и межтрубного пространств. Второй шаг — определение линейных скоростей движения нефти и дизельного топлива.

Режимы движения потоков теплоносителей и интенсивности теплообмена определяются значениями критериев Рейнольдса, Прандтля, Нуссельта. Следующий шаг — вычисление коэффициента теплоотдачи от горячего потока (дизельного топлива) к стенке трубы α_1 и коэффициента теплоотдачи от поверхности труб к нагреваемому сырью (нефти) α_2 . Расчет теплообменного аппарата выполняется по стандартным методикам. В связи с этим общеизвестные формулы и подробности расчета теплообменного аппарата не приводятся.

Коэффициент теплопередачи определяется по формуле:

$$K = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{\delta_t}{\lambda_t} + \frac{1}{\alpha_2}}, \quad (1)$$

где δ_t — толщина стенки теплообменных труб, м; λ_t — коэффициент теплопроводности, Вт/(м·°C); α_1, α_2 — коэффициенты теплоотдачи, Вт/(м²·°C).

Коэффициент теплопередачи зависит от коэффициентов теплоотдачи в теплообменных трубах, термического сопротивления теплопроводности стенки трубки.

При наличии загрязнений внутри и снаружи теплообменных труб коэффициент теплопередачи определяется следующей формулой:

$$K_z = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{\delta_t}{\lambda_t} + \sum r + \frac{1}{\alpha_2}}, \quad (2)$$

где $\sum r$ — суммарное термическое сопротивление слоя загрязнений, (м²·°C)/Вт.

Уравнение теплопередачи выглядит следующим образом:

$$Q = K \cdot F \cdot \Delta T, \quad (3)$$

где K — коэффициент теплопередачи, Вт/(м²·°C); F — поверхность теплообмена, м²; ΔT — средний температурный напор, °C.

Уравнение теплового баланса кожухотрубчатого теплообменника:

$$G_{LC} \cdot c_{LC} \cdot (T_{13} - T_{LC}) = G_n \cdot c_n \cdot (T_{n2} - T_{n1}), \quad (4)$$

где c_{LC} — теплоемкость дизельного топлива ЦО, кДж/(кг·°C); c_n — теплоемкость нефти, кДж/(кг·°C); G_{LC} — расход дизельного топлива ЦО; G_n — расход нефти, кг/с; T_{13} — температура на тарелке № 13 выхода дизельного топлива, °C; T_{LC} — температура возврата ЦО, °C; T_{n1} — температура нефти на входе в теплообменник, °C; T_{n2} — температура нефти на выходе из теплообменника, °C.

По исходным конструктивным данным выполнен поверочный расчет кожухотрубчатого теплообменника. Определены коэффициенты теплоотдачи, коэффициент теплопередачи, решена система уравнений (3) и (4).

На рис. 1 приведена блок-схема алгоритма решения уравнений (3) и (4) кожухотрубчатого теплообменника.

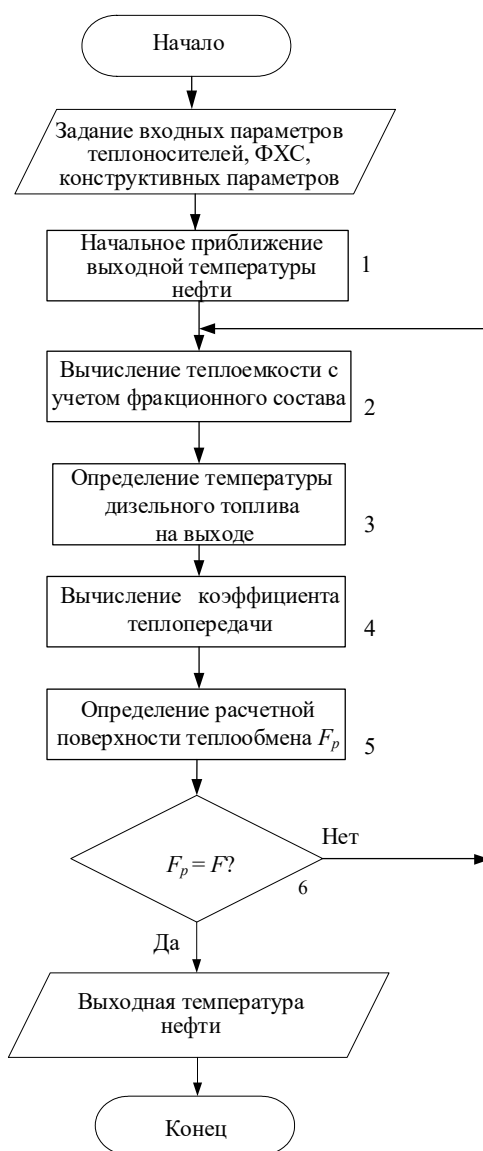


Рис. 1. Блок-схема алгоритма решения системы уравнений теплообменника

Температура дизельного топлива и нефти на выходе определяется с применением метода последовательных приближений. Для этого после задания исходных данных в блоке 1 необходимо выбрать первое приближение выходной температуры горячего теплоносителя (дизельного топлива).

В блоке 2 вычисляются теплоемкость нефти и дизельного топлива с учетом фракционного состава нефти. В блоке 3 выполняется вычисление выходной температуры дизельного топлива посредством решения уравнения теплового баланса теплообменного аппарата (4). В блоке 4 рассчитываются следующие параметры: средний температурный напор, коэффициент теплопередачи чистого теплообменника (1) и коэффициент теплопередачи с учетом коэффициента термического сопротивления слоя загрязнений (2).

В следующем блоке, 5, определяется расчетная площадь теплообмена из уравнения теплопередачи (3). В блоке 6 осуществляется верификация полученного значения расчетной площади. Существенное расхождение между полученным и заданным значениями свидетельствует о некорректном выборе температуры нефти и дизельного топлива. Итерационный расчет продолжается до достижения расхождения между расчетной и заданной площадями теплообмена не более 5 %. Решение системы нелинейных уравнений (3) и (4) реализовано с применением численных методов в среде Matlab.

Результаты расчета определяются при заданных значениях входных температур нефти и дизельного топлива и расходов нефти и дизельного топлива. Задаются свойства нефти (плотность, вязкость), ее фракционный состав по истинной температуре кипения (ИТК), конструктивные параметры теплообменника, тепловая нагрузка, термическое сопротивление слоя загрязнений поверхности труб.

На эффективность процесса теплообмена влияет термическое сопротивление загрязнений поверхности труб. Кроме этого, на выходные параметры, в частности на температуру теплоносителей на выходе, оказывают влияние состав и физико-химические свойства сырья. В данном исследовании использовались физико-химические свойства нефти трех месторождений (таблица 1).

Таблица 1

Физико-химические свойства нефти трех месторождений [12]

Нефть	Плотность ρ , кг/м ³	Выход фракций до 350 °С, %	Вязкость η , мПа·с	Содержание асфальтенов, %
Арланская	891	42,8	35,37	5,80
Туймазинская	856	53,4	10,18	3,40
Кулешовская	819	63,6	3,29	0,70

В таблице 1 приведены физико-химические свойства нефти различных месторождений. Плотность и вязкость связаны с содержанием асфальтенов. При увеличении молекулярной массы, температурного предела выкипания фракций плотность и вязкость возрастают. При этом в нефти с меньшей плотностью выход светлых фракций до 350 °С будет больше. Плотность и вязкость нефти из приведенных в таблице 1 ее физико-химических свойств могут измеряться на потоке и в лаборатории. Для установления связи между термическим коэффициентом сопротивления загрязнений, коэффициентом теплопередачи, а также плотностью и вязкостью нефти также использовались данные таблицы 1.

Для определения термического сопротивления загрязнений предлагается следующая методика. С использованием математической модели теплообменного аппарата, приведенной в работе [13], и формул (1–4) определяются входные и выходные параметры объекта. Они формируют обучающую выборку. Для определения термического сопротивления загрязнений и коэффициента теплопередачи в кожухотрубчатых теплообменниках предлагается применять искусственные нейронные сети [14] и методы машинного обучения, связанные с символьной регрессией и идентификацией систем. Примерами методов символьной регрессии являются SISSO [15], TorchSISSO [16], PySR [17], SyMANTIC, RGP. Для получения зависимостей между параметрами теплообменного аппарата выбраны методы PySR (High-Performance Symbolic Regression) и SISSO (Sure Independence Screening and Sparsifying Operator). Они позволяют находить математические выражения, связывающие исходные данные. Приведенные методы выбраны в связи с тем, что они подходят для работы с малыми наборами данных. Ключевые гиперпараметры метода PySR: `binary_operators` — список бинарных операторов ['+', '-', '*', '/', '^'], `unary_operators` — список унарных операторов ['sin', 'cos', 'exp', 'log', 'sqrt' и др.], `maxsize` — максимальный размер выражения, `niterations` — число итераций, `loss_function` — функция потерь, `population_size` — размер популяции. Ключевые гиперпараметры метода SISSO: `n_expansion` — число расширений признаков, `n_term` — число слагаемых в итоговой формуле, `k` — число признаков для L0-регуляризации, `initial_screening` — начальный отбор признаков, `operators` — набор математических операций для генерации признаков.

Для задач идентификации и прогнозирования за определенный период выбрана модель NARX (Nonlinear Autoregressive with Exogenous Inputs) — нелинейная авторегрессионная модель с внешними входами. Для определения ее структуры применялись алгоритмы FROLS (Forward Regression Orthogonal Least Squares) и CatBoostRegressor.

В представленной работе в качестве факторов принимались плотность нефти, температура горячего и холодного теплоносителей на выходе. Выходным параметром зависимости является термическое сопротивление загрязнений, или коэффициент теплопередачи. По математическому выражению, полученному с помощью методов PySR или SISSO, CatBoostRegressor или FROLS, и измеренным значениям технологических параметров вычисляется целевой параметр, позволяющий определять коэффициент теплопередачи и сроки технического обслуживания теплообменников.

Результаты исследования. При различных значениях термического загрязнения, плотности и вязкости нефти из разных источников (данные из таблицы 1) в таблице 2 представлены значения коэффициентов теплопередачи.

Таблица 2

Значения коэффициентов теплопередачи

Термическое сопротивление, (м ² ·°C)/Вт	Коэффициент теплопередачи чистого и загрязненного теплообменников, Вт/(м ² °C)		
	Арланская нефть	Туймазинская нефть	Кулешовская нефть
0,00000	95,27486	94,24999	93,19691
0,00018	93,97257	92,97539	91,95044
0,00036	92,70541	91,73479	90,73687
0,00055	91,47196	90,52687	89,55492
0,00073	90,27091	89,35035	88,40336
0,00091	89,10098	88,20401	87,28104
0,00109	87,96099	87,08672	86,18686
0,00127	86,84981	85,99737	85,11978
0,00145	85,76635	84,93495	84,07879
0,00164	84,70959	83,89845	83,06296
0,00182	83,67855	82,88695	82,07138
0,00200	82,67231	81,89954	81,1032

На следующем шаге вычислены выходные температуры теплоносителей (нефти и дизельного топлива) в зависимости от термического сопротивления слоя загрязнений и физико-химических свойств нефти (плотности и вязкости). На рис. 2 и 3 приведены полученные результаты.

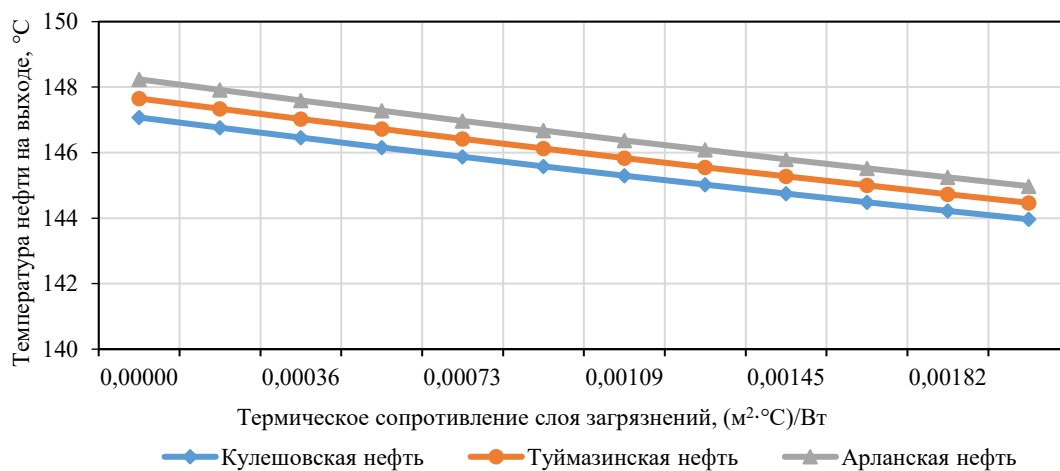


Рис. 2. Температура нефти на выходе

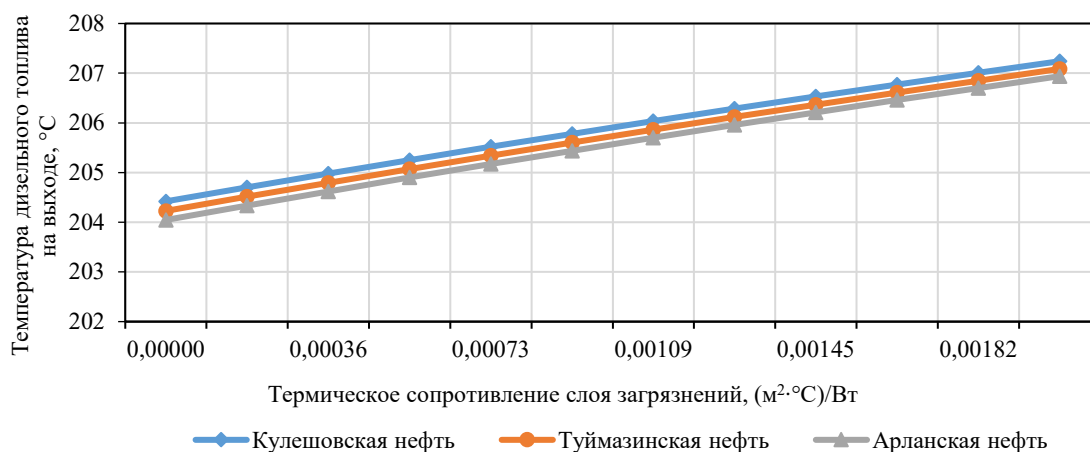


Рис. 3. Температура дизельного топлива на выходе

На графиках, приведенных на рис. 2 и 3, видно, что при наличии термического загрязнения поверхности труб эффективность теплообмена снижается. Температура нагреваемой нефти на выходе не достигает требуемого значения, соответствующего чистому теплообменнику. Для поддержания теплового потока на заданном уровне необходимо увеличить расход или температуру горячего теплоносителя.

Можно заметить, что при увеличении коэффициента термического загрязнения увеличиваются разность и соотношение между выходными температурами нефти и дизельного топлива. Эта закономерность учитывается при выводе зависимости коэффициента термического загрязнения методом SISSO. Также меняется величина отношения выходных температур загрязненного теплообменника к температурам чистого теплообменника. Эта закономерность учитывалась при применении метода PySR.

Для обучения на вход PySR и SISSO подаются значения плотности и температуры нефти на выходе и температура дизельного топлива на выходе. Целевым параметром является термическое сопротивление загрязнений. Инструментом реализации выбран программный пакет Python.

Примеры математических зависимостей для определения термического сопротивления загрязнений, полученных с помощью SISSO:

$$y = k_1 \cdot ((x_2 - x_3) - (x_2 / x_1)) - k_2 \cdot \frac{\ln(x_1)}{x_2 - x_3} + k_3 \cdot \frac{x_2 / x_3}{x_2 - x_3} + k_4, \quad (5)$$

где x_1 — плотность нефти, кг/м³; x_2 — выходная температура дизельного топлива, °C; x_3 — выходная температура нефти, °C; y — термическое сопротивление, (м²·°C)/Вт; k_1 – k_4 — коэффициенты.

С помощью PySR получена математическая зависимость для определения термического сопротивления загрязнений:

$$y = x_0 \times \log(x_1 + k_1) \cdot k_2 - \frac{k_3}{x_2}, \quad (6)$$

где x_0 — плотность нефти, кг/м³; x_1 — отношение выходной температуры дизельного топлива загрязненного теплообменника к выходной температуре дизельного топлива чистого теплообменника; x_2 — отношение выходной температуры нефти загрязненного теплообменника к выходной температуре нефти чистого теплообменника; y — термическое сопротивление, (м²·°C)/Вт; k_1 – k_3 — коэффициенты.

Для сравнения точности полученных зависимостей использована среднеквадратическая ошибка RMSE, определяющая среднюю разницу между прогнозируемыми и исходными данными. RMSE для выражения (5) составляет $1,250371 \cdot e^{-08}$ (м²·°C)/Вт. Для выражения (6) RMSE = $2,336612 \cdot e^{-08}$ (м²·°C)/Вт.

Математические выражения (5, 6) используются для нахождения значений термического сопротивления загрязнений по измеренным параметрам действующей установки.

Для практического применения также необходимо знать величины термического сопротивления загрязнений и коэффициента теплопередачи, определенные не только в данный момент, но и за некоторый период. Для получения последовательности значений термического сопротивления загрязнений и коэффициента теплопередачи необходимы архивные данные за прошлые периоды.

Обучающая и тестовая выборки формировались с помощью динамической модели теплообменного аппарата, приведенной в работе [18], с добавлением в модель зависимостей (5) или (6). После обучения и тестирования моделей существует возможность прогнозирования целевого параметра.

Для моделирования и прогнозирования нескольких значений целевого параметра за определенный период использовалась библиотека Python SysIdentPy. Модель NARX подходит для моделирования динамических систем, где используются как текущие, так и предыдущие значения входов и выходов.

Для выбора структуры модели применены алгоритмы FROLS и CatBoostRegressor. Подобраны лаги входных (xlag) и выходных (ylag) переменных. Значения лагов определены методом перебора.

Для алгоритма FROLS выбраны параметры:

- метод оценки параметров модели — LeastSquares и TotalLeastSquares;
- order_selection=True — автоматический подбор порядка модели (количества значимых термов);
- n_terms=12 — максимальное количество термов в итоговой модели;
- model_type="NARMAX" — тип модели;
- xlag=[1,1,1] — лаги для входных переменных;
- ylag=12 — лаги для целевой переменной;
- Polynomial — базовый класс для создания полиномиальных функций с выбором степени полинома (degree=2);
- информационный критерий — AIC (Akaike Information Criterion).

Для алгоритма CatBoostRegressor (регрессор на основе градиентного бустинга) определяются следующие гиперпараметры:

- iterations=500 — количество деревьев в ансамбле;
- learning_rate=0,1 — скорость обучения (шаг градиентного спуска);
- depth=6 — максимальная глубина деревьев;
- xlag=[1,1,1];
- ylag=12.

В данном случае решается задача прогнозирования параметра, вследствие чего получаются результаты, которых до настоящего момента не было. В связи с этим метод постпрогноза является наиболее подходящим. Обработанные данные разделены на две части — для построения модели и постпрогноза в соотношении 80/20.

После обучения модели выполнена оценка ее качества с помощью постпрогноза. Ошибка постпрогноза для алгоритма CatBoostRegressor $RMSE = 0,03573 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C})$, для алгоритма FROLS $RMSE = 0,01296 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C})$. При формировании обучающей и тестовой выборок использовался диапазон изменения термического сопротивления загрязнений от 0 до $0,0022 \text{ (м}^2 \cdot ^\circ\text{C})/\text{Вт}$, плотности нефти — от 810 до $910 \text{ кг}/\text{м}^3$. Полученные результаты для плотности нефти $900 \text{ кг}/\text{м}^3$ приведены на рис. 4.

Для валидации моделей использованы промышленные данные за 12 отсчетов. Временные ряды измеренных температур нефти и дизельного топлива обработаны с применением медианного фильтра. В качестве дополнительной информации использовались экспертные оценки технологов (в части дат плановых очисток теплообменников).

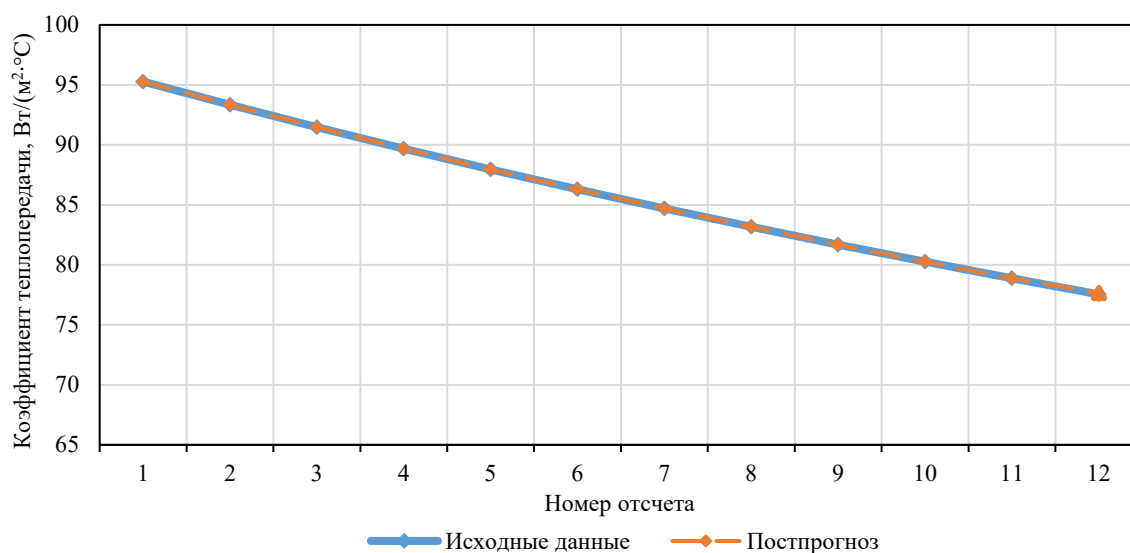


Рис. 4. Реальное и прогнозируемое значения коэффициента теплопередачи

Для чистого теплообменника коэффициент теплопередачи составляет $95 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C})$, а через 12 отсчетов — $77 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C})$. За это время коэффициент теплопередачи снизился на 18,61 %. Через 18 отсчетов (на рис. 4 не показано) коэффициент теплопередачи снизился на 25,2 %, что свидетельствует о необходимости проведения очистки оборудования для поддержания эффективности работы. Подобным образом можно выполнить прогноз целевого параметра в случае изменения плотности нефти.

Сравнивая значения коэффициента теплопередачи для чистого и загрязненного теплообменников за определенный период, можно сделать вывод о снижении эффективности теплообмена. При снижении параметра на 25 – 30 % формируется информация о необходимости очистки теплообменного аппарата.

Обсуждение. Результаты поверочного теплового расчёта кожухотрубчатого теплообменника установки переработки нефти малой мощности подтверждают корректность построенной математической модели. При увеличении суммарного термического сопротивления загрязнений от 0 до $0,002 \text{ (м}^2 \cdot ^\circ\text{C})/\text{Вт}$ коэффициент теплопередачи снижается приблизительно на 13 – 14 % для всех трёх исследований нефти из различных источников.

Установлена зависимость эффективности теплообмена от физико-химических свойств нефти. При увеличении плотности коэффициент теплопередачи несколько возрастает вследствие более высокой теплоёмкости и теплопроводности. Вместе с тем более тяжёлая нефть содержит больше асфальтосмолистых веществ, ускоряющих нарастание загрязнений. Таким образом, влияние плотности носит двойственный характер и требует дальнейшего изучения.

Методы символьной регрессии PySR и SISSO показали высокую точность восстановления аналитических зависимостей: RMSE составили $1,25 \cdot 10^{-8}$ и $2,34 \cdot 10^{-8}$ ($\text{м}^2 \cdot \text{°C}$)/Вт соответственно. Выражение, полученное методом SISSO, представляется более практически применимым, поскольку не требует эталонных значений температур чистого теплообменника.

В задаче прогнозирования алгоритм FROLS в составе модели NARX превзошёл CatBoostRegressor по точности (RMSE = 0,013 против 0,036 Вт/($\text{м}^2 \cdot \text{°C}$), что объясняется лучшей приспособленностью ортогональной регрессии к малым выборкам с гладкими динамическими зависимостями. Установленный критерий очистки (снижение коэффициента теплопередачи на 25–30 %) позволяет перейти от реактивной к проактивной стратегии технического обслуживания.

Заключение. В работе представлена методика определения коэффициента термического сопротивления загрязнений и коэффициента теплопередачи кожухотрубчатого теплообменника установки переработки нефти малой мощности на основе методов машинного обучения. В ходе исследования выполнен поверочный тепловой расчёт кожухотрубчатого теплообменника с использованием итерационного алгоритма решения системы уравнений теплопередачи и теплового баланса. Показано, что с ростом коэффициента термического загрязнения поверхности труб коэффициент теплопередачи снижается, а выходные температуры теплоносителей отклоняются от значений, соответствующих чистому аппарату. Установлено также влияние физико-химических свойств нефти — плотности и вязкости — на выходные параметры теплообменника.

С применением методов символьной регрессии PySR и SISSO получены аналитические зависимости коэффициента термического сопротивления загрязнений от выходных температур нефти и дизельного топлива, а также от плотности нефти. Среднеквадратическая ошибка полученных выражений не превышает $1,25 \cdot 10^{-8}$ и $2,34 \cdot 10^{-8}$ ($\text{м}^2 \cdot \text{°C}$)/Вт, что свидетельствует об их высокой точности.

Для прогнозирования коэффициента теплопередачи во времени применены алгоритмы FROLS и CatBoostRegressor в рамках модели NARX. По результатам постпрогноза, ошибка для алгоритма FROLS составила RMSE = 0,013 Вт/($\text{м}^2 \cdot \text{°C}$), для CatBoostRegressor — RMSE = 0,036 Вт/($\text{м}^2 \cdot \text{°C}$). На основе динамики прогнозируемого коэффициента теплопередачи показано, что снижение данного параметра на 25–30 % относительно значения чистого теплообменника является обоснованным критерием для назначения технического обслуживания.

Валидация разработанных моделей выполнена с использованием промышленных данных и экспертных оценок технологов, что подтверждает применимость предложенной методики в реальных условиях эксплуатации.

Практическая значимость работы состоит в том, что разработанная методика позволяет оперативно измеряемым технологическим параметрам — выходным температурам теплоносителей и плотности нефти — определять степень загрязнения теплообменного аппарата и прогнозировать сроки его очистки, что способствует повышению энергоэффективности и сокращению внеплановых простоев установок переработки нефти.

В перспективе предполагается расширение применения методики для других типов теплообменного оборудования, а также её интеграция в автоматизированные системы управления технологическими процессами.

Список литературы / References

1. Elistratova Y, Seminenko A, Minko V. Relevance of Contamination Models for Diagnostics of Plate Heat Exchangers. *Bulletin of Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov*. 2020;5(10):33–40. <https://doi.org/10.34031/2071-7318-2020-5-10-33-40>

2. Антипов А.И., Голубев Л.Г., Мухтаров Я.С. Влияние отложений в теплообменной аппаратуре на термические сопротивления и энергетические затраты на объектах промышленной подготовки нефти. *Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики*. 2003;(5–6):28–35.

Antipov AI, Golubev LG, Mukhtarov YaS. The Effect of Deposits of Solids in Heat Exchange Equipment on Thermal Resistances and Power Supply Costs in the Oil Fields Dealing with Oil Preparation. *Power Engineering: Research, Equipment, Technology*. 2003;5–6:28–35.

3. Демин А.М., Науменко А.П. Диагностирование теплообменного оборудования на основе режимных параметров установки гидроочистки дизельных топлив. *Омский научный вестник*. 2019;166(4):84–88. <https://doi.org/10.25206/1813-8225-2019-166-84-88>

Demin AM, Naumenko AP. Diagnostics of Heat Exchange Equipment on Basis of Operating Parameters of Diesel Fuel Hydrotreating Unit. *Omsk Scientific Bulletin*. 2019;166(4):84–88. <https://doi.org/10.25206/1813-8225-2019-166-84-88>

4. Позевалкин В.В., Поляков А.Н. Реализация цифровой модели тепловых характеристик на основе температурного поля. *Advanced Engineering Research (Rostov-on-Don)*. 2024;24(2):178–189. <https://doi.org/10.23947/2687-1653-2024-24-2-178-189>

Pozevalkin VV, Polyakov AN. Implementation of a Digital Model of Thermal Characteristics Based on the Temperature Field. *Advanced Engineering Research (Rostov-on-Don)*. 2024;24(2):178–189. <https://doi.org/10.23947/2687-1653-2024-24-2-178-189>

5. Губарева К.В., Еремин А.В. Численное решение задачи теплопроводности в пористой пластине с топологией трижды периодических минимальных поверхностей. *Advanced Engineering Research (Rostov-on-Don)*. 2025;25(1):23–31. <https://doi.org/10.23947/2687-1653-2025-25-1-23-31>

Gubareva KV, Eremin AV. Numerical Solution to the Problem of Thermal Conductivity in a Porous Plate with a Topology of Triply Periodic Minimal Surfaces. *Advanced Engineering Research (Rostov-on-Don)*. 2025;25(1):23–31. <https://doi.org/10.23947/2687-1653-2025-25-1-23-31>

6. Konygin SB, Konovalenko DV, Kryuchkov DA. Estimating the Effect of Instrument Accuracy on the Accuracy of Mathematical Modeling of Quality Indicators of Oil Treatment for Transportation. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2020;862(3):032068. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/862/3/032068>

7. Martins T, Spengler AW, Oliveira JLG, de Paiva KV, Seman LO. Active Control System to Prevent Malfunctioning Caused by the Pressure Difference in Gasket Plate Heat Exchangers Applied in the Oil and Gas Industry. *Sensors*. 2022;22(12):4422. <https://doi.org/10.3390/s22124422>

8. Gil'fanov KK, Shakirov RA. Neural Network Modeling of Thermal Hydraulic Efficiency of Promising Surface Heat Transfer Intensifiers. *Russian Aeronautics*. 2021;64(1):61–70. <https://doi.org/10.3103/S1068799821010086>

9. Tugashova LG, Zatonskiy AV. Comparison of Methods for Heat Exchanger Control. *Theoretical Foundations of Chemical Engineering*. 2021;55(1):53–61. <https://doi.org/10.1134/S0040579520060226>

10. Sahoo A, Radhakrishnan TK, Sankar Rao C. Modeling and Control of a Real Time Shell and Tube Heat Exchanger. *Resource-Efficient Technologies*. 2017;3(1):124–132. <https://doi.org/10.1016/j.refit.2016.12.001>

11. Глаголева О.Ф., Капустин В.М., Пискунов И.В., Усманов МР. Регулирование агрегативной устойчивости сырьевых смесей и товарных нефтепродуктов (обзор). *Нефтехимия*. 2020;60(5):577–585.

Glagoleva OF, Kapustin VM, Piskunov IV, Usmanov MR. Controlling the Aggregative Stability of Feedstock Blends and Petroleum Products. *Petroleum Chemistry*. 2020;60(5):971–978. <https://doi.org/10.1134/S0965544120090108>

12. Капустин В.М., Рудин М.Г., Кукес С.Г. *Справочник нефтепереработчика*. Москва: Химия; 2018. 416 с. Kapustin VM, Rudin MG, Kukes SG. *Handbook of Oil Refiner*. Moscow: Khimiya; 2018. 416 p. (In Russ.)

13. Тугашова Л.Г. *Повышение энергоэффективности и производительности на объектах топливно-энергетического комплекса с применением методов моделирования и оптимизации*. Монография. Альметьевск: АГТУ ВШН; 2025. 100 с.

Tugashova LG. *Increasing Energy Efficiency and Productivity at Fuel and Energy Complex Facilities Using Modeling and Optimization Methods*. Monograph. Almet'yevsk: ASTU "HSO"; 2025. 101 p. (In Russ.)

14. Дерябин И.А., Королев В.В., Сорокин Г.С. Использование рекуррентной нейронной сети для решения обратной задачи теплопроводности применительно к расчету температуры оборудования с ВВЭР. *Известия вузов. Ядерная энергетика*. 2024;(4):144–154. <https://doi.org/10.26583/npe.2024.4.12>

Deryabin IA, Korolev VV, Sorokin GS. Using a Recurrent Neural Network for Solving Inverse Heat Conduction Problem with Application to Calculating the Temperature of Equipment of VVER-Based NPPs. *Nuclear Power Engineering*. 2024;(4):144–154. <https://doi.org/10.26583/npe.2024.4.12>

15. Xiaolin Jiang, Guanqi Liu, Jiaying Xie, Zhenpeng Hu. Boosting SISSO Performance on Small Sample Datasets by Using Random Forests Prescreening for Complex Feature Selection. [arXiv:2409.19209](https://arxiv.org/abs/2409.19209)

16. Muthyala M, Sorourifar F, Paulson JA. TorchSISSO: A PyTorch-Based Implementation of the Sure Independence Screening and Sparsifying Operator for Efficient and Interpretable Model Discovery. *Digital Chemical Engineering*. 2024;13:100198. <https://doi.org/10.1016/j.dche.2024.100198>

17. Tonda A. Review of PySR: High-Performance Symbolic Regression in Python and Julia. *Genetic Programming and Evolvable Machines*. 2025;26:7. <https://doi.org/10.1007/s10710-024-09503-4>

18. Затонский А.В., Тугашова Л.Г. Идентификация параметров динамической модели теплообменного аппарата. *Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Электротехника, информационные технологии, системы управления*. 2020;33:99–114. <https://doi.org/10.15593/2224-9397/2020.1.06>

Zatonskiy AV, Tugashova LG. Identification of Parameters of a Dynamic Model of a Heat Exchange Apparatus. *Perm National Research Polytechnic University Bulletin. Electrotechnics, Information Technologies, Control Systems*. 2020;33:99–114. <https://doi.org/10.15593/2224-9397/2020.1.06>

Об авторах:

Лариса Геннадьевна Тугашова, кандидат технических наук, доцент кафедры «Автоматизация и информационные технологии» Альметьевского государственного технологического университета «Высшая школа нефти» (423462, Российская Федерация, г. Альметьевск, ул. Советская, 186 а), [SPIN-код](#), [ORCID](#), [ScopusID](#), [ResearcherID](#), tugashova@yandex.ru

Андрей Владимирович Затонский, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Автоматизация и информационные технологии» Березниковского филиала Пермского национального исследовательского политехнического университета (614990, Российская Федерация, г. Пермь, пр. Комсомольский, 29), [SPIN-код](#), [ORCID](#), [ScopusID](#), [ResearchGate](#), z Xenon@narod.ru

Заявленный вклад авторов:

Л.Г. Тугашова: формальный анализ, проведение исследования, разработка методологии, написание черновика рукописи, написание рукописи – рецензирование и редактирование.

А.В. Затонский: формальный анализ, написание черновика рукописи, написание рукописи – рецензирование и редактирование.

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

About the Authors:

Larisa G. Tugashova, Cand.Sci. (Eng.), Associate Professor of the Department of Automation and Information Technologies, Almet'yevsk State Technological University "Higher School of Petroleum" (186 a, Sovetskaya Str., Almet'yevsk, 423462, Russian Federation), [SPIN-code](#), [ORCID](#), [ScopusID](#), [ResearcherID](#), tugashova@yandex.ru

Andrey V. Zatonskiy, Dr.Sci. (Eng.), Professor, Head of the Department of Automation and Information Technologies, Perm National Research Polytechnic University, Berezniki Branch (29, Komsomolsky Pr, Perm, 614990, Russian Federation), [SPIN-code](#), [ORCID](#), [ScopusID](#), [ResearchGate](#), z Xenon@narod.ru

Claimed Contributorship:

LG Tugashova: formal analysis, investigation, methodology, writing – original draft preparation, writing – review & editing.

AV Zatonskiy: formal analysis, writing – original draft preparation, writing – review & editing.

Conflict of Interest Statement: the authors declare no conflict of interest.

The authors have read and approved the final version of the manuscript.

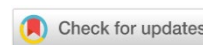
Поступила в редакцию / Received 16.02.2026

Поступила после рецензирования / Reviewed 13.03.2026

Принята к публикации / Accepted 23.03.2026

ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

INFORMATION TECHNOLOGY, COMPUTER SCIENCE AND MANAGEMENT



УДК 681.51:004.81:536.2

Оригинальное эмпирическое исследование

<https://doi.org/10.23947/2687-1653-2026-26-2-2661>

Аппаратная реализация нечеткой логики на базе элементов тепловой памяти для отказоустойчивого управления в машиностроении



EDN: PHGHYE

О.В. Володина¹ , А.А. Скворцов¹  , М.Р. Рыбакова¹, М.В. Корячко^{1,2} 

¹ Московский политехнический университет, г. Москва, Российская Федерация

² Российский технологический университет — МИРЭА, г. Москва, Российская Федерация

✉ skvortsovaa2009@yandex.ru

Аннотация

Введение. Автоматизация высокотемпературных процессов (например, лазерной сварки) требует отказоустойчивых систем управления в реальном времени. Традиционные микропроцессоры имеют критические программные задержки, а перспективные платформы вычислений в памяти (MRAM, RRAM) подвержены термической нестабильности и дрейфу состояний в горячих зонах. Существует научный пробел в знаниях о разработке контроллеров, использующих физику теплопереноса в качестве вычислительной среды, превращая тепловую помеху в логический сигнал. Цель данной работы — компьютерное моделирование тепловых потоков в элементах тепловой памяти (ЭТП) для обоснования аппаратной реализации нечеткого вывода. В исследовании решаются задачи топологического формирования вентилях AND/OR и анализа влияния диэлектрической изоляции на настройку весовых параметров.

Материалы и методы. Исследование тепловых процессов в ячейках памяти (алюминиевая плёнка, 2–5 мкм, на кремниевой подложке) были проведены методом конечных элементов в модуле Transient Thermal платформы ANSYS Workbench. Ячейки изготовлены методом вакуумного электронно-лучевого испарения: алюминиевые дорожки шириной 75 мкм и длиной 4 мм формировались на подложке кремния. Воздействие осуществлялось прямоугольными токовыми импульсами с амплитудой тока $(2–2,5) \cdot 10^{10}$ А/м² и длительностью 1–2 мс, локальный нагрев структур доходил до 30 °С. Для реализации логических вентилях AND и OR менялись межэлементные расстояния — 0,1 и 0,5 мм соответственно — топологическим способом. Для направленного управления тепловыми потоками в конструкцию были введены диэлектрические карманы из SiO₂ глубиной 30 мкм.

Результаты исследования. На основе разработанных компьютерных моделей в среде ANSYS Workbench проведено комплексное исследование нестационарных тепловых полей в структурах ЭТП. Доказано, что внедрение диэлектрической изоляции из SiO₂ позволяет эффективно управлять направлением и мощностью теплового потока, исключая паразитное рассеивание энергии. В ходе моделирования физически обоснована возможность аппаратного формирования базы правил нечеткого вывода непосредственно в топологии кристалла. Установлено, что варьирование межэлементных расстояний является ключевым фактором настройки логики: дистанция в 0,1 мм между входными и выходными элементами обеспечивает реализацию логической операции OR, а дистанция 0,5 мм — операции AND.

Обсуждение. Полученные данные подтверждают, что использование пространственного наложения тепловых полей позволяет реализовать нечеткие операции без программных задержек. Время реакции разработанных моделей логических вентилях (1–2 мс) на порядок превосходит показатели стандартных программируемых логических контроллеров (ПЛК) — 20–50 мс. В отличие от памяти на фазовых переходах предложенный метод демонстрирует устойчивость к внешним температурным помехам за счет алгоритмической коррекции логических порогов. Основным ограничением работы является тепловая инерционность кремниевой подложки, которая обуславливает расхождение между результатами моделирования в ANSYS и натурными экспериментами на уровне 5–7 %.

Заключение. Полученные результаты подтверждают возможность аппаратного задания топологии базы правил нечеткого вывода и реализацию вычислений в памяти (in-memory computing). Это открывает перспективы для внедрения периферийного искусственного интеллекта (Edge AI) непосредственно в горячие зоны промышленного оборудования.

Ключевые слова: тепловая память, нечеткая логика, аппаратный логический вывод, фазификация, вычисления в памяти, кремниевые структуры

Благодарности. Авторы выражают признательность доктору физико-математических наук, профессору Каленкову С.Г. и доктору технических наук, профессору Бескопильному А.Н. за стимулирующие дискуссии. Также благодарим редакционную команду журнала и рецензента за компетентную экспертизу и ценные рекомендации по улучшению статьи.

Финансирование. Исследование выполнено в рамках гранта Российского научного фонда РФ № 25-79-10123.

Для цитирования. Володина О.В., Скворцов А.А., Рыбакова М.Р., Корячко М.В. Аппаратная реализация нечеткой логики на базе элементов тепловой памяти для отказоустойчивого управления в машиностроении. *Advanced Engineering Research (Rostov-on-Don)*. 2026;26(2):2661. <https://doi.org/10.23947/2687-1653-2026-26-2-2661>

Original Empirical Research

Hardware Implementation of Fuzzy Logic Based on Thermal Memory Elements for Fault-Tolerant Control in Mechanical Engineering

Olga V. Volodina¹ , Arkadiy A. Skvortsov¹  , Margarita R. Rybakova¹, Marina V. Koryachko^{1,2} 

¹ Moscow Polytechnic University, Moscow, Russian Federation

² Russian Technological University — MIREA, Moscow, Russian Federation

 skvortsovaa2009@yandex.ru

Abstract

Introduction. The automation of high-temperature processes (for example, laser welding) requires fault-tolerant real-time control systems. Traditional microprocessors exhibit critical software latencies, while promising in-memory computing platforms (MRAM, RRAM) are subject to thermal instability and state drift in hot zones. There is a significant scientific gap in the development of controllers capable of utilizing heat transfer physics as a computational medium, thereby converting thermal interference into a useful logic signal. This study is aimed at the computer modeling of heat flows in thermal memory elements (TME) to justify the hardware implementation of fuzzy logic inference. The research addresses the tasks of the topological formation of AND/OR logic gates and the analysis of the impact of dielectric insulation on the weight parameter adjustment.

Materials and Methods. The investigation of thermal processes in memory cells (a 2–5 μm aluminum film on a silicon substrate) was conducted by the finite element method in the Transient Thermal module of ANSYS Workbench. The cells were fabricated via vacuum electron-beam evaporation: aluminum tracks 75 μm wide and 4 mm long were formed on the silicon substrate. The structures were subjected to rectangular current pulses with a current density amplitude of $(2–2.5) \cdot 10^{10}$ A/m² and a duration of 1–2 ms; the local heating of the structures reached up to 30°C. To implement AND and OR logic gates, the interelement distances were topologically varied to 0.1 mm and 0.5 mm, respectively. Furthermore, SiO₂ dielectric pockets with a depth of 30 μm were introduced into the design for directional heat flow control.

Results. Based on the developed computer models in ANSYS Workbench, a comprehensive study of non-stationary thermal fields in TME structures was conducted. It is proven that the integration of SiO₂ dielectric insulation effectively controls the direction and power of the heat flow, eliminating parasitic energy dissipation. The modeling physically substantiates the feasibility of hardware formation of a fuzzy inference rule base directly within the crystal topology. It is established that varying the interelement distances is the key factor in logic setting: a distance of 0.1 mm between the input and output elements provides the realization of the OR logic operation, whereas a 0.5 mm distance corresponds to the AND operation.

Discussion. The data obtained confirm that thermal field superposition enables delay-free fuzzy logic operations. The logic gate models developed exhibit response times (1–2 ms) that are an order of magnitude lower than those of standard PLC (20–50 ms). In contrast to phase-change memory (PCM), the proposed method demonstrates robustness against external temperature noise through the algorithmic correction of logic thresholds. The primary limitation of this study is the thermal inertia of the silicon substrate, which accounts for a 5–7% discrepancy between the ANSYS simulation results and in-situ experiments.

Conclusion. The findings validate the feasibility of hardware-based topological design for a fuzzy inference rule base and the practical implementation of in-memory computing. This opens up promising prospects for integrating peripheral artificial intelligence (Edge AI) directly into the hot zones of industrial equipment.

Keywords: thermal memory, fuzzy logic, hardware fuzzy inference, fuzzification, in-memory computing, silicon structures

Acknowledgments. The authors would like to thank Professor S.G. Kalenkov, Dr.Sci. (Physics-Mathematics), and Professor A.N. Beskopylny, Dr.Sci. (Engineering), for stimulating discussions. We also appreciate the Journal editorial team and the reviewer for their professional assessment and valuable recommendations for improving the article.

Funding Information. This research was supported by the Russian Science Foundation, grant No. 25-79-10123.

For Citation. Volodina OV, Skvortsov AA, Rybakova MR, Koryachko MV. Hardware Implementation of Fuzzy Logic Based on Thermal Memory Elements for Fault-Tolerant Control in Mechanical Engineering. *Advanced Engineering Research (Rostov-on-Don)*. 2026;26(2):2661. <https://doi.org/10.23947/2687-1653-2026-26-2-2661>

Введение. Современный этап развития глобального машиностроения, который характеризуется переходом к концепциям Industry 4.0 и 5.0, предъявляет высокие требования к надежности систем автоматизации [1]. Технологические процессы, например, высокоточное литье, лазерная и электронно-лучевая сварка, а также многоступенчатая термическая обработка, протекают в условиях воздействия экстремальных факторов: высокоинтенсивных электромагнитных полей, вибрационных нагрузок и сверхвысоких температурных градиентов. В условиях экстремальных температурных полей и электромагнитных помех традиционная микропроцессорная архитектура фон Неймана демонстрирует критическое снижение эффективности [2, 3]. До 80 % времени и энергии вычислительного цикла ПЛК затрачивается на пересылку данных по уязвимым шинам, что формирует задержку отклика до 20–50 мс. Стандартные микропроцессоры требуют громоздких систем защиты и экранирования от электромагнитных помех. Более того, реализация интеллектуальных алгоритмов управления, в частности нечеткой логики (Fuzzy Logic), в программном виде сопряжена с критическими задержками, которые возникают из-за многократного преобразования сигналов в цепи «аналого-цифровой преобразователь (АЦП) — процессор — цифро-аналоговый преобразователь (ЦАП)» и последовательного выполнения программного кода микроконтроллера. Алгоритмы управления высокоскоростными производственными системами должны работать без задержек [4], поэтому необходимо использовать параллельные аппаратные вычислители, где логический вывод не зависит от тактовой частоты центрального процессора. Переход к альтернативным платформам вычислений в памяти (In-Memory Computing, IMC) позволит обрабатывать сигналы непосредственно в физической среде (in situ).

Одно из возможных направлений реализации алгоритма вычислений в памяти является создание многозначных логических схем [5], которые позволят реализовать нечеткую логику схемотехнически, через изменение физических свойств материала, таких как сопротивление или теплопроводность. Наиболее изученным термическим способом реализации IMC является память на фазовых переходах (импульсно-кодовая модуляция, Pulse Code Modulation, PCM) [6], алгоритм работы которой основан на кодировании информации через изменение агрегатного состояния халькогенидного стекла в результате повышения температуры при нагреве. Но необходимо учитывать, что использование PCM в горячих цехах (например, в зоне лазерной сварки) сталкивается с проблемой самопроизвольного переключения фаз из-за высокого внешнего теплового фона, что делает их непригодными для систем экстренной защиты.

В качестве базовых элементов аппаратной нечеткой логики второго типа рассматриваются и мемристорные структуры (RRAM) [7], для которых характерны такие же проблемы. Мемристорные кроссбары подвержены термическому дрейфу резистивных состояний, что приводит к накоплению ошибок в весовых коэффициентах нечеткого вывода. Логичным продолжением выступает область термотроники [8] (фононики [9]). Были проведены эксперименты, которые продемонстрировали работу наноразмерных тепловых логических вентилях (NOT, AND, OR) с энергопотреблением порядка фемтоджоуля [10]. Изучение волновых термопластических логических вентилях, построенных с использованием термически настраиваемых метаматериалов, привело к выводу о возможности создания сверхсложных комбинируемых схем, встроенных непосредственно в конструкционный материал [11]. Но данные решения носят исключительно лабораторный характер: они работают на наномасштабном уровне и требуют качественной изоляции от макроскопического теплового шума.

Таким образом, в современном научном знании наблюдается явный пробел: существующие твердотельные решения (PCM, RRAM) чувствительны к внешним тепловым помехам, а нанофононные устройства не масштабируемы для промышленных условий. Решением этой проблемы может стать разработка макроскопических элементов тепловой памяти (ЭТП), которые используют само наложение тепловых потоков для вычислений, превращая вредный перегрев оборудования в полезный сигнал.

В отличие от классической электроники тепловая память использует динамический диапазон нагрева [12] как аналоговую величину. Динамическое изменение температуры ЭТП напрямую отображает функции принадлежности нечетких множеств. Таким образом, элемент тепловой памяти не просто становится устройством хранения, а превращается в активную вычислительную среду, реализующую алгоритмы нечеткой логики второго типа.

В отличие от классических алгоритмов нечеткая логика второго типа (Type-2 Fuzzy Logic) оперирует функциями принадлежности, которые сами по себе являются нечеткими множествами. Степень принадлежности здесь — это не конкретное число, а диапазон (интервал). Алгоритмы нечеткой логики могут напрямую обрабатывать лингвистические переменные и выполнять интуитивный процесс принятия решений, подобный человеческому [13], что позволит использовать их в системах отказоустойчивого управления (Fault-Tolerant Control Systems, FTCS) [14].

Целью данной работы является разработка метода аппаратной реализации нечеткого логического вывода на базе структур тепловой памяти. Предложенный метод позволит объединить преимущества термической стабильности, помехозащищенности системы и интеллектуальной обработки данных в решении задачи по созданию отказоустойчивых систем управления нового поколения для современного машиностроения.

Материалы и методы. Рассматриваемые в работе элементы тепловой памяти представляют собой структуры типа «металлическая пленка — кремниевая подложка». В отличие от традиционных цифровых ячеек памяти эти элементы хранят информацию в тепловом состоянии. Как активная вычислительная среда, они интегрируют хранение, обработку и нечеткую логику в одной ячейке, проявляя сильную чувствительность к подводимой энергии. Токковые импульсы служат входными сигналами: распределение тепла от локального нагрева реализует операции типа AND/OR. Это позволяет создавать нейроморфные сети без транзисторов для распознавания откликов с энергоэффективностью до 10^{-15} Дж/операция.

Именно поэтому в качестве ячейки тепловой памяти авторами использовались структуры, представляющие собой дорожки металлизации, напыленные методом электронно-лучевого испарения на кремниевую пластину (рис. 1). В качестве подложки использовалась кремниевая пластина толщиной 450 мкм и удельным сопротивлением 30 Ом·см. В роли токоведущего слоя использовались алюминиевые пленки толщиной $h = 3-5$ мкм. Ширина дорожки металлизации $b = 75$ мкм, а её длина $l = 4$ мм. Зонды (1–12) использовались для регистрации осциллограмм в процессе прохождения токовых импульсов [12]. Одиночные токовые импульсы формировались с помощью оригинальной установки. Длительность прямоугольного токового импульса не превышала $\tau = 1$ мс, а амплитуда $j = 8 \cdot 10^{10}$ А/м². Омическое сопротивление структуры находилось в диапазоне $R = 0,3-0,5$ Ом.

Результаты предварительных исследований показали, что данная система хорошо работает до температуры $T = 550$ °С. Дальнейшее увеличение тепловых нагрузок приводит к началу деградационных процессов. Они связаны с процессами контактного плавления на межфазной границе Al–Si ($T_c = 577$ °С) и с процессами электродиффузии, приводящими к необратимым изменениям в структуре металлической дорожки [15].

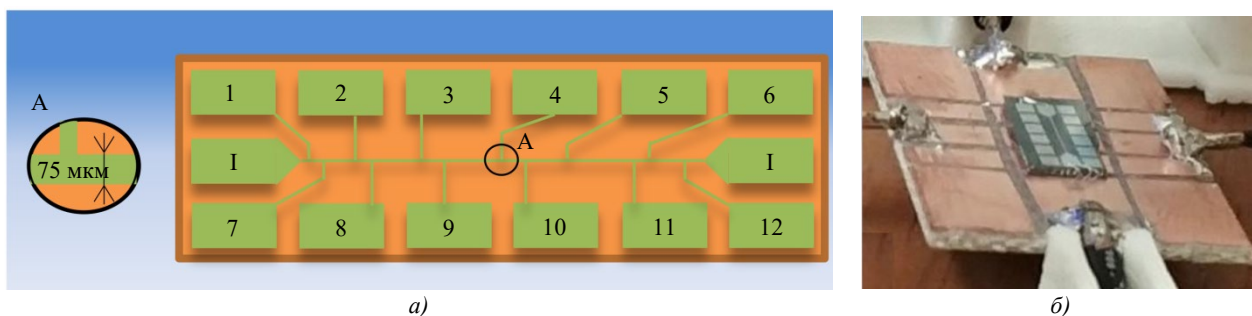


Рис. 1. Аппаратная реализация ячейки тепловой памяти: *a* — схематическое представление; *б* — экспериментальная электрофизическая установка

Для проведения вычислительного эксперимента и оценки пространственного распределения тепловых полей применялся метод конечных элементов в модуле Transient Thermal платформы ANSYS Workbench. Численное решение путем построения тепловой модели на основе метода конечных элементов в системе инженерного анализа ANSYS показало себя как эффективный подход для расчета температурных полей различных объектов машиностроения [16].

Трёхмерная геометрическая модель (рис. 2) включала в себя монокристаллическую кремниевую подложку толщиной 2 мм, на поверхности которой располагались токоведущие дорожки из алюминия (длина — 4 мм, ширина — 75 мкм, толщина — 3 мкм), выполняющие функцию ЭТП. Для направленного управления тепловым потоком и исключения взаимного влияния входных элементов в структуру были интегрированы диэлектрические теплоизолирующие карманы из диоксида кремния (SiO₂) глубиной 30 мкм и толщиной 1 мкм.

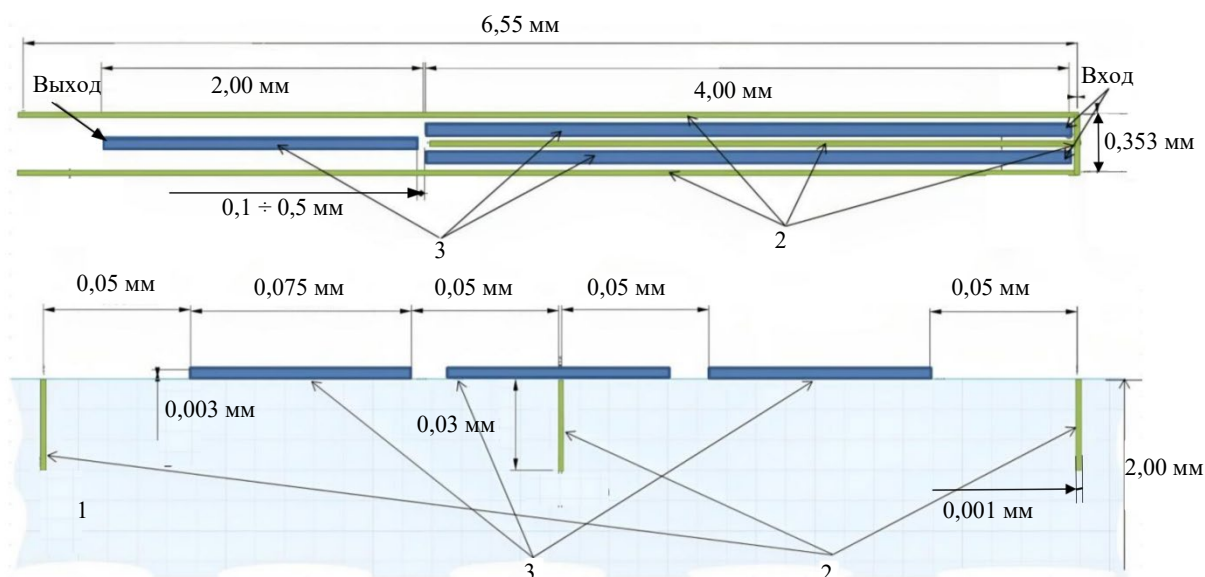


Рис. 2. Геометрия структуры логического вентиля: 1 — кремниевая пластина; 2 — изолирующие слои диэлектрика; 3 — металлические дорожки

При настройке решателя (Solver) задавались следующие термодинамические свойства материалов:

1. Кремний (Si): плотность — 2330 кг/м^3 , теплопроводность — $148 \text{ Вт/(м}\cdot\text{°C)}$, удельная теплоемкость — $712 \text{ Дж/(кг}\cdot\text{°C)}$.
2. Диоксид кремния (SiO_2): плотность — 2220 кг/м^3 , теплопроводность — $1,5 \text{ Вт/(м}\cdot\text{°C)}$, удельная теплоемкость — $745 \text{ Дж/(кг}\cdot\text{°C)}$.
3. Алюминий (Al): плотность — 2689 кг/м^3 , теплопроводность — $237,5 \text{ Вт/(м}\cdot\text{°C)}$, удельная теплоемкость — $951 \text{ Дж/(кг}\cdot\text{°C)}$.

Генерация расчетной неструктурированной сетки производилась во встроенном модуле ANSYS Meshing (рис. 3).



Рис. 3. Изображение построенной сетки на модели кремниевой пластины с элементом тепловой памяти в диэлектрическом кармане шириной 100 мкм

В качестве граничных условий на свободных поверхностях кремниевой пластины задавался конвективный теплообмен с окружающей средой при коэффициенте теплоотдачи $5 \text{ Вт/(м}^2\cdot\text{°C)}$. Тепловое воздействие моделировалось путем задания распределенной по объему алюминиевых дорожек мощности тепловыделения. Логика работы вентиля проверялась путем оценки температуры на выходном ЭТП при варьировании дистанции теплового зазора (от 0,1 до 0,5 мм).

Для использования данной физической структуры в качестве вычислителя нечеткой логики должна быть установлена прямая связь между теплофизическими процессами и математическим аппаратом нечетких множеств. Чтобы установить аппаратное соответствие между конкретным численным значением входной переменной (сигналом от датчика температуры) и значением функции принадлежности соответствующего ей терма входной лингвистической переменной (термов «логический 0», «логическая 1», «критический перегрев») проведена процедура нахождения значений функций принадлежности нечетких множеств (термов) на основе четких исходных данных — процесс фаззификации.

Фаззификация и формирование веса входного воздействия. В разработанной архитектуре ЭТП входные электрические импульсы от датчиков преобразуются в локальные тепловые поля непосредственно в структуре «алюминиевая дорожка — кремниевая подложка». Ключевым параметром на данном этапе выступает вес входного воздействия. Если в классических программных алгоритмах вес задается абстрактным числовым коэффициентом, то в предлагаемой аппаратной реализации он имеет определенный физический смысл, характеризует промежуточное состояние системы между логическими 0 и 1. Вес определяется количеством выделяемой тепловой энергии (мощностью теплового потока), которая зависит от амплитуды протекающего импульса тока ($2 \cdot 10^{10} < I_m < 2,5 \cdot 10^{10} \text{ А/м}^2$) и его длительности (1–2 мс). Чем выше значения этих электрических параметров, тем интенсивнее локальный джоулев нагрев элемента. Физическое повышение температуры ЭТП эквивалентно математическому росту степени принадлежности входной переменной к нечеткому терму «логическая 1». Таким образом, динамика температуры $T(t)$ ЭТП выступает аналоговым носителем информации о принадлежности к нечеткому множеству.

Таким образом, определив степени принадлежности нескольких входных воздействий, система должна выполнить операцию логического вывода результата аппаратного вычисления, т. е. сформировать результирующее значение на основе базы правил. В отличие от микропроцессоров, где логический вывод требует ресурсоемких математических вычислений, в матрице ЭТП эта процедура реализуется на аппаратном уровне за счет сложения тепловых потоков в объеме кремниевой подложки. Для нивелирования неконтролируемого взаимного влияния элементов тепловой памяти и задания жестких правил вывода (формирования топологии базы правил) используются диэлектрические карманы из оксида кремния (SiO_2) (рис. 2).

Диэлектрические карманы выступают в роли тепловых барьеров, строго направляя тепловые потоки к весовому (выходному) элементу матрицы для выполнения операций пересечения или объединения.

Реализация аппаратных операций пересечения AND и объединения OR. Для создания отказоустойчивых систем управления, реализующих аппаратную нечеткую логику непосредственно в структуре запоминающего устройства, авторами исследованы механизмы управления пространственным распределением тепловых полей. В программном комплексе SolidWorks построены 3D-модели, демонстрирующие топологическую аппаратную реализацию логических операций AND и OR на базе элементов тепловой памяти (ЭТП).

Операция OR (MAX / Объединение). Реализуется при минимальном расстоянии между элементами (0,1 мм) (рис. 4, 5). Тепловой мощности даже одного нагретого входа в условиях локализованного карманами теплового потока достаточно для переключения выходного элемента в состояние «логической 1» (нагрев на $\approx 2^\circ\text{C}$), что соответствует фиксации критического события по любому из каналов.

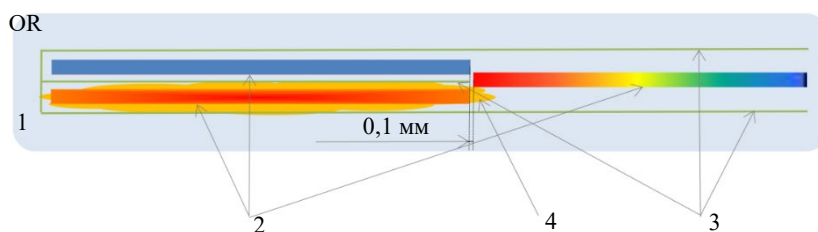


Рис. 4. Аппаратная реализация операции OR, расстояние между входными и выходным элементами — 0,1 мм:
 1 — кремниевая пластина; 2 — металлические дорожки;
 3 — изолирующие слои диэлектрика; 4 — направление распространения тепла

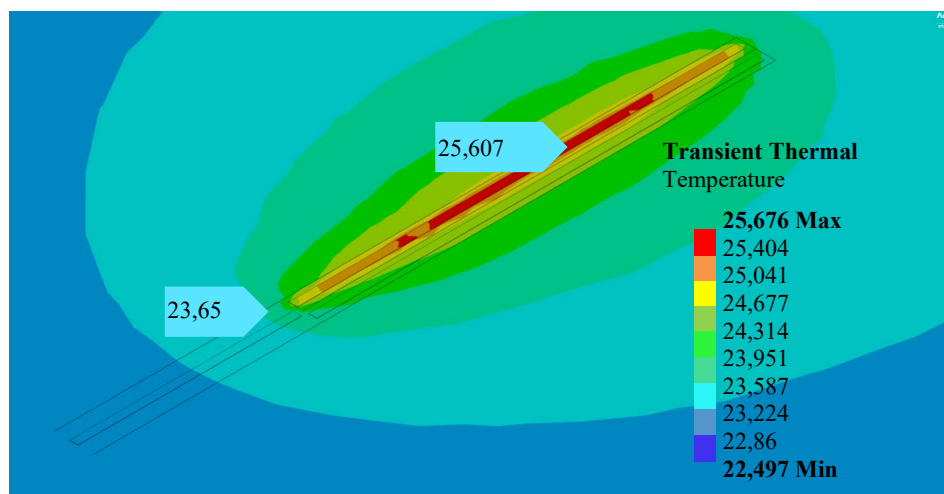


Рис. 5. Имитационная модель логического вентиля OR: температурное поле при дистанции 0,1 мм между входными и выходным ЭТП (нагрев одного входного элемента)

Операция AND (MIN / Пересечение). Реализуется при увеличении расстояния до 0,5 мм (рис. 6, 7). В этом случае выходной элемент достигает порога срабатывания только при одновременном нагреве обоих входов, что физически эмулирует пересечение условий (например, «высокая температура» и «длительное время воздействия»).

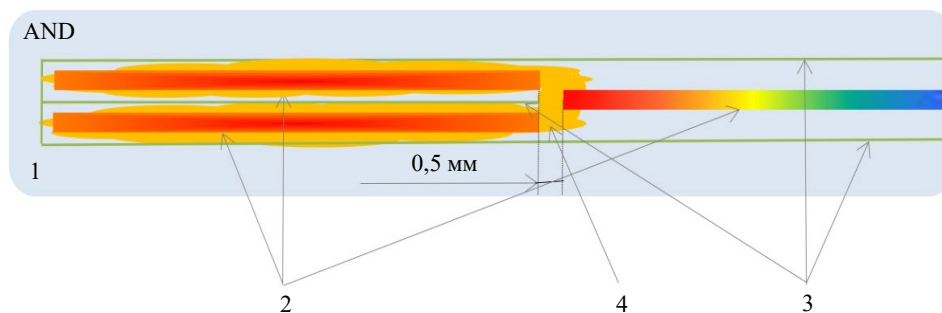


Рис. 6. Аппаратная реализация операции AND, расстояние между входными и выходным элементами — 0,5 мм:

- 1 — кремниевая пластина; 2 — металлические дорожки;
3 — изолирующие слои диэлектрика, 4 — направление распространения тепла

Имитационное моделирование работы логических вентилях AND проведено на платформе ANSYS Workbench (рис. 5, 7) с использованием модуля Transient Thermal для нестационарных тепловых расчетов.

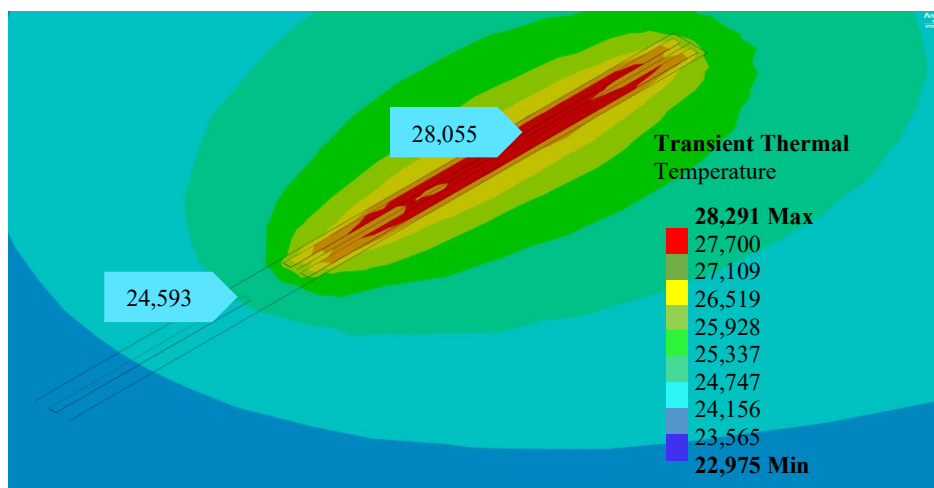


Рис. 7. Имитационная модель логического вентиля AND: температурное поле при дистанции 0,5 мм между входными и выходным ЭТП (одновременный нагрев двух входных элементов)

Результаты моделирования (рис. 5, 7) полностью подтвердили эффективность использования тепловой изоляции (SiO_2) и выбранных геометрических дистанций для настройки весовых параметров аппаратного нечеткого вывода.

Результаты исследования. В ходе проведенного исследования теоретически обоснована концепция аппаратной реализации нечеткого логического вывода на базе элементов тепловой памяти (ЭТП). Установлено, что применение планарной системы металлизации на кремниевой подложке позволит обойти аппаратные ограничения классической архитектуры фон Неймана за счет переноса процессов фазификации и дефазификации напрямую в физическую среду полупроводника.

Результаты компьютерного моделирования в среде ANSYS Workbench подтвердили, что предложенная пространственная организация наложения тепловых полей внутри материала позволит успешно выполнить базовые операции нечеткой логики. Определено, что возможность задавать топологию базы нечетких правил дает прецизионное пространственное взаиморасположение матрицы ЭТП и использование изолирующих диэлектрических карманов из оксида кремния (SiO_2). Найдены оптимальные линейные размеры между входными ЭТП и выходным весовым ЭТП: дистанция между элементами в 0,1 мм гарантирует выполнение операции объединения (логическое ИЛИ / OR), а увеличение теплового зазора до 0,5 мм устанавливает правила для операции пересечения (логическое И / AND), переключая выходной элемент только при совместном тепловом воздействии.

Результаты моделирования доказывают, что аппаратная реализация нечеткой логики на базе ЭТП позволит преодолеть ограничения классических микропроцессорных систем в задачах автоматизации быстропротекающих процессов.

Время реакции разработанных моделей логических вентилях — 1–2 мс, для сравнения цикл обработки нечетких алгоритмов стандартными ПЛК обычно составляет 20–50 мс. Использование макроскопического теплопереноса в качестве полезного сигнала отличает предложенные ЭТП от технологий РСМ (памяти на фазовых переходах), склонных к самопроизвольному переключению под внешним тепловым фоном. В отличие от мемристорных структур (RRAM) ЭТП более устойчивы к температурному дрейфу состояний в горячих зонах за счет применения оригинального алгоритма плавающего нуля.

Обсуждение. Результаты проведенного исследования имеют практическую значимость в области отказоустойчивого управления технологическим процессом (ТП) автоматизированной лазерной (или электронно-лучевой) сварки тонкостенных конструкций. Данный ТП характеризуется высокой скоростью протекания теплофизических реакций (миллисекундный диапазон) и наличием электромагнитных помех от силовых инверторов, что делает применение классических микропроцессоров для нечеткого контроля невозможным без специальных методов защиты.

Критическим нарушением данного ТП является образование дефектов сварного шва (прожог, испарение легирующих элементов или критические термические напряжения). Для предотвращения брака необходимо одновременно контролировать два параметра: температуру сварочной ванны (определяемую бесконтактным пирометром) и время удержания этой температуры (или тока накачки лазера).

Отказоустойчивое управление данным технологическим процессом возможно построить на базе аппаратной реализации логического вентиля AND, представляющего собой трехэлементную структуру тепловой памяти: два входных ЭТП (вход А — температурный фактор, вход Б — временной или мощностной фактор) и один выходной (весовой) элемент, формирующий команду на корректировку или экстренный останов процесса (рис. 8).

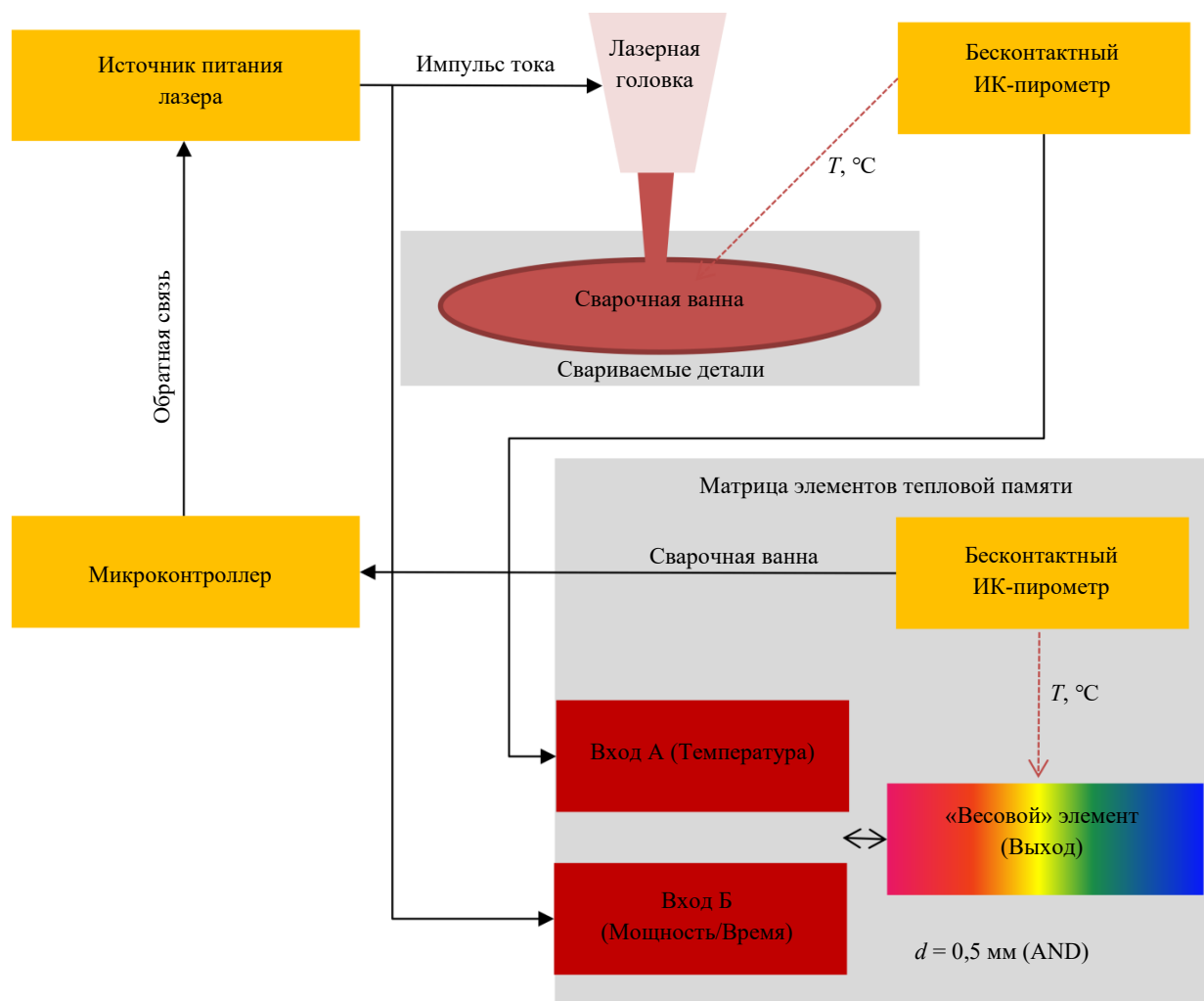


Рис. 8. Схема интеграции отказоустойчивого вычислителя на базе ЭТП в процесс лазерной сварки

Высокая скорость отклика объясняется отсутствием этапов аналого-цифрового преобразования — логический вывод происходит непосредственно в физической среде. Реализованный вентиль AND (на базе трехэлементной структуры) физически суммирует факторы мощности лазера и температуры сварочной ванны, что позволяет интерпретировать тепловое состояние системы как лингвистическую переменную.

Интеграция активной вычислительной среды в ТП лазерной сварки позволит решить следующие проблемы:

- предотвратить необратимые нарушения техпроцесса (деградацию микроструктуры шва, термические повреждения или сквозной прожог);
- провести корректировку подачи энергии за 1–2 мс;
- матрица ЭТП даст возможность реализовать парадигму периферийных вычислений (Edge Computing) непосредственно в горячей зоне ТП. Это разгрузит промышленные сети передачи данных и исключит задержки (latency) при принятии критических решений.

Аппаратная реализация нечеткой логики на ЭТП решает задачи высокотемпературной диагностики в условиях горячих цехов (например, литейного производства), где классические полупроводниковые контроллеры неизбежно выходят из строя или принудительно отключаются встроенными системами защиты от перегрева [17].

Основным ограничением работы ЭТП является тепловая инерционность кремниевой подложки, которая обуславливает расхождение между результатами моделирования в ANSYS и натурными экспериментами на уровне 5–7 %. Также следует учитывать, что предложенный метод ориентирован на высокоскоростную пороговую логику (защита от брака) и не заменяет высокоточные системы числового программного управления.

Заключение. В ходе исследования обоснован метод аппаратной реализации нечеткого логического вывода на базе элементов тепловой памяти (ЭТП) для систем промышленной автоматизации.

1. Разработаны метод организации хранения информации и алгоритм плавающего нуля, обеспечивающие адаптивную коррекцию логических порогов. Это позволяет стабилизировать работу логических ячеек в условиях нестационарного температурного фона, характерного для производственных цехов.

2. С помощью имитационного моделирования доказана возможность формирования базы правил нечеткого вывода топологическим способом. Установлено, что варьирование межэлементного расстояния в кремниевой структуре (0,1 мм для операции OR и 0,5 мм для AND) позволяет эмулировать логические операции непосредственно за счет распределения тепловых полей.

3. Обоснована эффективность применения ЭТП в качестве периферийных вычислительных звеньев в зонах экстремальных воздействий. Показано, что использование предложенных структур сокращает время реакции системы на тепловое событие до 1–2 мс, что достаточно для предотвращения прожогов и дефектов при лазерной сварке.

Перспективы дальнейших исследований. Основываясь на успешной аппаратной реализации базовых логических вентилей (AND/OR), дальнейшие исследования целесообразно развивать в следующих направлениях.

1. Масштабирование вычислительной архитектуры: переход от единичных логических вентилей к топологическому синтезу многомерных матриц ЭТП. Это позволит аппаратно реализовать комплексные базы правил нечеткого вывода, оперирующие тремя и более входными лингвистическими переменными для многокритериального управления процессом. Как показывают современные исследования, многокритериальная оптимизация с учетом противоречащих друг другу критериев (например, поиск оптимальной температуры) востребована для повышения качества продукции и эффективности сложных химических реакций. Аппаратная реализация позволит перенести подобные многокритериальные вычисления непосредственно в физическую среду оборудования.

2. Оптимизация быстродействия системы: поскольку в ходе моделирования была выявлена погрешность в 5–7 %, обусловленная тепловой инерционностью кремниевой подложки, перспективной задачей является исследование альтернативных диэлектрических материалов и топологий (например, локальное утонение подложки). Это позволит минимизировать паразитное рассеивание тепла и снизить время реакции контроллера до субмиллисекундного диапазона.

3. Полунатурное HiL-моделирование (Hardware-in-the-Loop): проведение испытаний, при которых физический макет отказоустойчивого вычислителя на базе ЭТП будет интегрирован в контур управления цифрового двойника реального технологического оборудования. Это даст возможность оценить робастность предложенной архитектуры (Edge AI) в условиях генерации реальных высокочастотных электромагнитных помех от силовых сварочных инверторов.

Список литературы / References

1. Praveen Kumar Reddy Maddikunta, Quoc Viet Pham, Prabadevi B, N Deepa, Kapal Dev, Thippa Reddy Gadekallu, et al. Industry 5.0: A Survey on Enabling Technologies and Potential Applications. *Journal of Industrial Information Integration*. 2022;26:100257. <https://doi.org/10.1016/j.jii.2021.100257>
2. Hao Wang, Bin Sun, Shuzhi Sam Ge, Jie Su, Ming Liang Jin. On Non-Von Neumann Flexible Neuromorphic Vision Sensors. *Npj Flex Electron*. 2024;8:28. <https://doi.org/10.1038/s41528-024-00313-3>

3. Zhou Wenjun, Zhu Chuan, Ma Jianmin. Single-Layer Folded RNN for Time Series Prediction and Classification under a Non-Von Neumann Architecture. *Digital Signal Processing*. 2024;147:104415. <https://doi.org/10.1016/j.dsp.2024.104415>
4. Nada AA, Bayoumi MA. Development of Embedded Fuzzy Control Using Reconfigurable FPGA Technology. *Automatika*. 2024;65(2):609–626. <https://doi.org/10.1080/00051144.2024.2313904>
5. Jiayang Wang, Yuzhe Lin, Chenhao Hu, Shiqi Zhou, Shenyu Gu, Mengjie Yang, et al. A Kind of Optoelectronic Memristor Model and Its Applications in Multi-Valued Logic. *Electronics (MDPI)*. 2023;12(3):646. <https://doi.org/10.3390/electronics12030646>
6. Sebastian A, Le Gallo M, Khaddam-Aljameh R, Eleftheriou E. Memory Devices and Applications for In-Memory Computing. *Nature Nanotechnology*. 2020;15:529–544. <https://doi.org/10.1038/s41565-020-0655-z>
7. Haghzad Klidbary S, Javadian M, Omid R, Hasanzadeh RPR. Memristor Crossbar-Based Hardware Implementation of Type-2 Fuzzy Membership Function and On-Chip Learning. *International Journal of Engineering*, 2021;34(9):2180–2188. <https://doi.org/10.5829/ije.2021.34.09c.15>
8. Ben-Abdallah Ph, Biehs S-A. Thermotronics: Towards Nanocircuits to Manage Radiative Heat Flux. *Zeitschrift fur Naturforschung A*. 2016;72(2):151–162 <https://doi.org/10.1515/zna-2016-0358>
9. Lei Wang, Baowen Li. Thermal Memory: A Storage of Phononic Information. *Physical Review Letters*. 2008;101:267203. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.101.267203>
10. Hui Wang, Noordzij N, Mikhailov M, Steinhauer S, Descamps Th, Oksenberg E, et al. Attojoule Superconducting Thermal Logic and Memories. *Nano Letters*. 2025;25(11):4401–4407. <https://doi.org/10.1021/acs.nanolett.4c06545>
11. Fort E, Mousa M, Nouh M. Thermoelastic Wave-Based Logic for Mechanically Cognitive Materials. *arXiv:2511.00647*. 2025. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2511.00647>
12. Skvortsov AA, Pshonkin DE, Volodina OV, Nikolaev VK. Metallization System as a Part of Thermal Memory. *Heliyon*. 2023;9(5): e15797. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e15797>
13. Haziqah B, Idris A. Temperature Control in a Shower Using Fuzzy Logic. *Proceedings of Science and Mathematics*. 2024;24:56–64.
14. Riaz U, Amin AA, Tayyeb M. Design of active fault-tolerant control system for Air-fuel ratio control of internal combustion engines using fuzzy logic controller. *Science Progress*. 2022;105(2):1–29. <https://doi.org/10.1177/00368504221101962>
15. Kulchin YuN, Skvortsov AA, Nikolaev VK, Volodina OV. Development of Thermal Memory Cells on Silicon Using the Floating Zero Algorithm. *Scientific Reports*. 2025;15:5184. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-89566-0>
16. Alexandrova AA, Koledin SN. Optimal Temperature Calculation for Multicriteria Optimization of the Hydrogenation of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons by NSGA-II Method. *Advanced Engineering Research (Rostov-on-Don)*. 2024; 24(1):109–118. <https://doi.org/10.23947/2687-1653-2024-24-1-109-118>
17. Васильев А. Светодиодные светильники для горячих цехов. (*Электротехнический рынок*). 2025;(2):62–65. Vasiliev A. LED Luminaires for Hhot Shops. *Electrical Engineering Market Magazine*. 2025;(2):62–65. (In Russ.)

Об авторах:

Ольга Вячеславовна Володина, старший преподаватель кафедры «Динамика, прочность машин и сопротивление материалов» Московского политехнического университета (107023, Российская Федерация, г. Москва, ул. Большая Семёновская, 38), [SPIN-код](#), [ORCID](#), [ScopusID](#), [ResearcherID](#), moosbeere_O@mail.ru

Аркадий Алексеевич Скворцов, доктор физико-математических наук, заведующий кафедрой «Динамика, прочность машин и сопротивление материалов» Московского политехнического университета (107023, Российская Федерация, г. Москва, ул. Большая Семёновская, 38), [SPIN-код](#), [ORCID](#), [ScopusID](#), [ResearcherID](#), [ResearchGate](#), skvortsovaa2009@yandex.ru

Маргарита Рушановна Рыбакова, доцент кафедры «Динамика, прочность машин и сопротивление материалов» Московского политехнического университета (107023, Российская Федерация, г. Москва, ул. Большая Семёновская, 38), [SPIN-код](#), [ScopusID](#), sopr_kaf@mospolytech.ru

Марина Валерьевна Корячко, кандидат физико-математических наук, доцент кафедры «Высшая математика-3» МИРЭА — РТУ (119454, Российская Федерация, г. Москва, пр. Вернадского, 78), [SPIN-код](#), [ORCID](#), [ScopusID](#), [ResearcherID](#), [ResearchGate](#), m.v.koryachko@gmail.com

Заявленный вклад авторов:

О.В. Володина: концептуализация, методология, программное обеспечение, проведение исследования, разработка алгоритма плавающего нуля, написание черновика рукописи, визуализация.

А.А. Скворцов: научное руководство, концептуализация, методология, валидация результатов, написание рукописи.

М.Р. Рыбакова: формальный анализ, проведение исследования.

М.В. Корячко: формальный анализ, валидация результатов.

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

About the Authors:

Olga V. Volodina, Senior Lecturer of the Department of Dynamics, Strength of Machines and Resistance of Materials, Moscow Polytechnic University (38, Bolshaya Semyonovskaya Str., Moscow, 107023, Russian Federation), [SPIN-code](#), [ORCID](#), [ScopusID](#), [ResearcherID](#), moosbeere_O@mail.ru

Arkadiy A. Skvortsov, Dr.Sci. (Phys.-Math.), Head of the Department of Dynamics, Strength of Machines and Resistance of Materials, Moscow Polytechnic University (38, Bolshaya Semyonovskaya Str., Moscow, 107023, Russian Federation), [SPIN-code](#), [ORCID](#), [ScopusID](#), [ResearcherID](#), [ResearchGate](#), skvortsovaa2009@yandex.ru

Margarita R. Rybakova, Senior Lecturer of the Department of Dynamics, Strength of Machines and Resistance of Materials, Moscow Polytechnic University (38, Bolshaya Semyonovskaya Str., Moscow, 107023, Russian Federation), [SPIN-code](#), [ScopusID](#), sopr_kaf@mospolytech.ru

Marina V. Koryachko, Cand.Sci. (Phys.-Math.), Associate Professor of the Department of Higher Mathematics-3, Russian Technological University — MIREA (78, Vernadsky Ave., Moscow, 119454, Russian Federation), [SPIN-code](#), [ORCID](#), [ScopusID](#), [ResearcherID](#), [ResearchGate](#), m.v.koryachko@gmail.com

Claimed Contributorship:

OV Volodina: conceptualization, methodology, software, investigation, “floating zero” algorithm development, writing – original draft preparation, visualization.

AA Skvortsov: supervision, conceptualization, methodology, validation, writing.

MR Rybakova: formal analysis, investigation, writing.

MV Koryachko: formal analysis, validation, writing.

Conflict of Interest Statement: the authors declare no conflict of interest.

All authors have read and approved the final version of manuscript.

Поступила в редакцию / Received 10.03.2026

Поступила после рецензирования / Reviewed 17.04.2026

Принята к публикации / Accepted 07.05.2026

ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ INFORMATION TECHNOLOGY, COMPUTER SCIENCE AND MANAGEMENT



УДК 621.395.4

Оригинальное теоретическое исследование

<https://doi.org/10.23947/2687-1653-2026-26-2-2221>

Аналитическая модель буферной памяти OpenFlow коммутатора программно управляемой сети SDN

 Г.В. Слюсарев , В.П. Мочалов , Д.В. Гостева  

Северо-Кавказский федеральный университет, г. Ставрополь, Российская Федерация

✉ DVGus@yandex.ru

EDN: MPFRRV

Аннотация

Введение. Достоверное выявление вероятностно-временных особенностей узлов коммутации необходимо для оценки количественных характеристик программно конфигурируемых сетей. Широко используемые методы теории массового обслуживания (ТМО) лишь приближенно определяют и моделируют процессы в коммутаторе OpenFlow и его буферной памяти. Это ведет к получению заниженных, не реалистичных характеристик проектируемых сетевых устройств, перегрузке буферной памяти коммутаторов и потере сетевых пакетов. Проблему может решить иной подход к моделированию. Цель представленной работы — создание и исследование аналитической модели буферной памяти OpenFlow коммутатора программно управляемой сети SDN с использованием усовершенствованных методов ТМО.

Материалы и методы. Задействовали аппарат дискретного преобразования Лапласа–Стилтьеса. Учитывались статистические характеристики потоков пакетов и пропускная способность каналов связи при заданной вероятности потерь пакетов. Модель буферной памяти коммутатора OpenFlow базируется на математическом аппарате ТМО. Его строили в предположении рекуррентности входных потоков данных с групповым поступлением. Исходили из схематически представленных структур коммутатора, набора его записей и графового описания передачи выходящих из коммутатора сетевых пакетов. Приняли как допустимые два ограничения модели:

- произвольное распределение зависимости между объемом потоков данных и временем их обслуживания;
- дискретность распределения структуры информационных потоков.

Результаты исследования. Созданная модель интегрирует вероятность потери потоков пакетов, их статистические характеристики, пропускную способность вычислительных устройств и процедуру многофазного обслуживания. При проверке работоспособности модели приняли, что загрузка коммутатора увеличивается от 0,1 до 0,9, а вероятность потери — от 10^{-3} до 10^{-6} . Для этих показателей выяснили, как от загрузки коммутатора зависят объем буферной памяти и время ожидания. В первом случае минимальное значение (объем памяти) — 0,201, максимальное — 10564. Во втором — 0 и 470 мс соответственно. Для имитационного моделирования минимум по времени — 0 мс, максимум — 2300 мс. Показатели имитационного и аналитического моделирования близки при загрузке менее 50 % и увеличиваются в несколько раз при загрузке более 50 %. Показатели резко возрастают с загрузкой до 70 %, а затемкратно увеличиваются.

Обсуждение. При невысокой сетевой загрузке очереди не переполняются, пакеты не теряются, сохраняются линейные зависимости. При средней и высокой загрузке обработка потоков пакетов описывается нелинейными зависимостями. Результаты аналитического и имитационного моделирования расходятся из-за взрывообразного характера самоподобного сетевого трафика и его приближенного описания распределением Парето. Загруженность коммутатора определяет целесообразность применения предложенного подхода. Модель подойдет при проектировании элементов программно конфигурируемых сетей для анализа их устойчивости при различных информационных воздействиях.

Заключение. Предложенная аналитическая модель SDN определяет значения и дисперсии объема буферной памяти коммутатора, а также объемы памяти для построения таблиц потоков адресации. Работоспособность решения проверили при загрузке коммутатора от 0,1 до 0,9. Планируется создать модель, учитывающую потоки заявок как из внешней сети, так и от сервера.

Ключевые слова: совершенствование методов теории массового обслуживания, аналитическая модель буферной памяти OpenFlow, потеря сетевых пакетов, имитационное моделирование коммутатора

Благодарности. Авторы выражают благодарность редакции, академическому редактору и рецензентам за внимательное отношение к статье и замечания, которые позволили повысить ее качество.

Для цитирования. Слюсарев Г.В., Мочалов В.П., Гостева Д.В. Аналитическая модель буферной памяти OpenFlow коммутатора программно управляемой сети SDN. *Advanced Engineering Research (Rostov-on-Don)*. 2026;26(2):2221. <https://doi.org/10.23947/2687-1653-2026-26-2-2221>

Original Theoretical Research

Analytical Model of the Buffer Memory of an OpenFlow Switch in a Software-Defined Network (SDN)

Gennady V. Slyusarev , Valery P. Mochalov , Dar'ya V. Gosteva  

North-Caucasus Federal University, Stavropol, Russian Federation

 DVGus@yandex.ru

Abstract

Introduction. Reliable identification of the probabilistic and temporal features of switching nodes is required for assessing the quantitative characteristics of software-defined networks. Widely used queuing theory (QT) methods only approximately specify and model the processes in an OpenFlow switch and its buffer memory. This results in understated and unrealistic performance estimates for the designed network equipment, causing switch buffer overloading and packet loss. A different modeling approach can solve this problem. The objective of this paper is to develop and study an analytical model for the buffer memory of an OpenFlow switch in an SDN using advanced techniques.

Materials and Methods. The discrete Laplace-Stieltjes transform was used. Statistical characteristics of packet flows and the throughput of communication channels for a given packet loss probability were taken into account. The OpenFlow switch buffer memory model was based on the mathematical apparatus of the QT. It was constructed under the assumption of recurrence of input data flows with batch arrivals. The model was based on schematic representations of the switch structure, its record set, and a graph description of the transmission of network packets leaving the switch. We started with schematic representations of the switch structure, its record set, and a graph description of the transmission of network packets exiting the switch. Two model assumptions were taken as acceptable:

- arbitrary distribution of the relationship between the volume of data flows and their service time;
- discreteness of the distribution of the information flow structure.

Results. The developed model integrated the probability of packet flow loss, their statistical characteristics, the throughput of computing devices, and the multiphase service procedure. When testing the model performance, we assumed that the switch load increased from 0.1 to 0.9, and the loss probability — from 10^{-3} to 10^{-6} . For these metrics, we determined how the switch load affected the buffer memory size and latency. In the first case, the minimum value (memory capacity) was 0.201, the maximum — 10564. In the second, they were 0 and 470 ms, respectively. For simulation modeling, the minimum time was 0 ms, the maximum — 2300 ms. The simulation and analytical modeling indicators were close at loads below 50% and increased several times at loads above 50%. The indicators increased sharply with loads up to 70%, and then increased exponentially.

Discussion. At low network loads, queues did not overflow, packets were not lost, and linear dependences were maintained. At medium and high loads, packet flow processing was described by nonlinear dependences. The results of analytical and simulation modeling diverged due to the explosive nature of self-similar network traffic and its approximate description by the Pareto distribution. Switch load determined the feasibility of the proposed approach. The model is suitable for designing elements of software-defined networks to analyze their resilience under various information impacts.

Conclusion. The proposed SDN analytical model determined the values and variances of the switch buffer memory size, as well as the memory capacity for constructing address flow tables. The solution performance was tested with switch loads ranging from 0.1 to 0.9. It is planned to create a model that takes into account request flows from both the external network and the server.

Keywords: improving queueing theory methods, OpenFlow buffer memory analytical model, network packet loss, switch simulation modeling

Acknowledgements. The authors would like to thank the Editorial board and the reviewers for their attentive attitude to the article and for the specified comments that improved its quality.

For Citation. Slyusarev GV, Mochalov VP, Gosteva DV. Analytical Model of the Buffer Memory of an OpenFlow Switch in a Software-Defined Network (SDN). *Advanced Engineering Research (Rostov-on-Don)*. 2026;26(2):2221. <https://doi.org/10.23947/2687-1653-2026-26-2-2221>

Введение. Программируемые сети SDN и протокол управления сетевыми устройствами OpenFlow создавались для повышения автоматизации управления современными компьютерными сетями и поддержки заданного качества облачных сервисов, то есть для задач, решаемых путем динамического перераспределения сетевых ресурсов между пользователями. Один из основных элементов программно управляемых сетей — коммутатор потоков OpenFlow, а его важнейшая часть — буферная память. Используя внутренний программный конвейер, коммутатор распределяет и балансирует нагрузки между каналами сетевой структуры. Так достигается гибкость централизованного управления ресурсами сети.

Оценка количественных характеристик функционирования сетей включает выявление вероятностно-временных особенностей узлов коммутации. Для этого широко используются методы теории массового обслуживания (ТМО), которые лишь приближенно определяют и моделируют процессы в коммутаторе OpenFlow и его буферной памяти. Это ведет к получению заниженных, не реалистичных характеристик проектируемых сетевых устройств, перегрузке буферной памяти коммутаторов и потере сетевых пакетов. Для устранения проблемы предлагается иной подход к моделированию. Цель представленной работы — создание и исследование аналитической модели буферной памяти OpenFlow коммутатора программно управляемой сети SDN с использованием усовершенствованных методов ТМО. Для достижения цели используется аппарат дискретного преобразования Лапласа-Стилтьеса (ПЛС), учитываются статистические характеристики потоков пакетов и пропускная способность каналов связи при заданной вероятности потерь пакетов. Подобная математическая модель на основе классической ТМО описана в [1], но она не устраняет проблемы, которые возникают из-за приближенного описания сетевых процессов.

В научной литературе предлагаются конструктивные решения для совершенствования элементов сетей передачи данных, что говорит о важности и актуальности решаемой научно-технической задачи. Моделям OpenFlow коммутаторов программно управляемых сетей SDN посвящены работы Рагхава С.С., Баскакова А.Е., Волкова А.С., Филиппова И.А., Никишина К.И., Гурина Е.И., Тихоненко О.М., Горбунова А.В., Лебедева А.В., Самуйлова К.Е., Шалимова И.А. и др. В [2] приводится достаточно полный обзор сетевых решений, основанных главным образом на классической ТМО. Исследуются системы конечной пропускной способности с рекуррентным входным потоком, марковским процессом обслуживания и накопителями бесконечного объема. Методы моделирования базируются на замене рекуррентных потоков заявок простейшими. Зависимость объема требований от времени обслуживания предполагается заданной, или ею пренебрегают. Вероятность потерь пакетов принимается пренебрежимо малой. В подобных моделях, как правило, используется не всегда верное утверждение, что потоки пакетов теряются, если занят весь объем буферной памяти. Предполагается также неограниченный суммарный объем памяти и вполне определенный характер связи между объемом сообщений и временем обслуживания. В большинстве публикаций отсутствуют конечные выражения, позволяющие анализировать качество обслуживания коммутатора с учетом особенностей распределения буферной памяти, показателями потерь и нагрузки. В этих случаях авторы пользуются численными методами готовых программных пакетов.

Научная новизна представленного исследования заключается в усовершенствовании классических методов ТМО, обеспечивающих исследование систем с произвольно распределенными функциями поступления и обслуживания заявок. Практическая значимость результатов работы подтверждается двумя факторами. Во-первых, создается аналитическая модель буферной памяти коммутатора OpenFlow сети SDN, обеспечивающая достаточно точное ее исследование. Во-вторых, открывается возможность выбора альтернативных вариантов построения на этапе проектирования. Результативность предлагаемой модели оценивается при моделировании. Полученные показатели качества позволяют оценить эффективность коммутатора OpenFlow сети SDN.

Материалы и методы. Входной поток пакетов сети SDN поступает на коммутатор OpenFlow, который извлекает метаданные, проверяет их на соответствие записям в адресных таблицах и формирует направление передачи. Сетевая операционная система контроллера SDN распределяет пакеты по потокам, которые конфигурирует классификатор OpenFlow. Коммутатор OpenFlow объединяет множество таблиц потоков, управляемых центральным контроллером с помощью инструкций и пересылки пакетов. Контроллер SDN периодически меняет свои записи о структуре сети, нагрузке, используемых ресурсах, резерве. В соответствии с этим он устанавливает правила пересылки для всех поступивших потоков, последовательно распределяет их по выходным OpenFlow портам коммутатора, устанавливает новые параметры действий и выполняет потоковую рассылку или передачу обратно в сеть. При этом задействуется программный конвейер коммутатора в виде последовательных таблиц потоков.

Пакеты, не идентифицированные в таблицах потоков, передаются на другой порт коммутатора или пересылаются контроллеру для изменения полей. SDN-контроллер формирует выходные порты коммутатора, адресные таблицы, а также классификаторы потоков данных [3].

Вопросам управления сетевыми устройствами уделяется большое внимание, есть готовые конструктивные решения. Несмотря на это, создаются новые эффективные методы и протоколы управления сетевой нагрузкой, постоянно дорабатываются протоколы управления сетями. Небольшой срок опытной эксплуатации сетей SDN и отсутствие систематизированных результатов тестирования коммутационного оборудования на платформе OpenFlow вызывают необходимость дальнейших исследований с применением аналитических и имитационных моделей.

Таким образом, структурную схему коммутатора можно представить в виде системы массового обслуживания (СМО) с ограниченным объемом памяти. На ее вход поступает поток пакетов с произвольными законами распределения числа и объемов требований. Режим работы такой системы будет стационарным, если среднее число требований, поступающих за единицу времени, не превышает максимально возможной скорости их обслуживания. При этом одна из важнейших задач — определение средних значений и дисперсии общего объема буферной памяти коммутатора, а также объемов памяти для построения таблиц потоков [4]. Предположим, что на входе высокопроизводительного центрального управляющего сервера нет очередей потоков пакетов. В этом случае функционирование коммутатора в стационарном режиме можно описать аппаратом систем массового обслуживания с преобразованиями Лапласа-Стилтьеса. Распределение и обработка данных с помощью программного конвейера моделируется как многофазный случайный процесс [5].

Усовершенствованный метод ТМО, используемый в данной работе, позволяет формировать модели многих реальных систем, в том числе коммутационных. Можно обоснованно предположить, что есть стационарные характеристики подобных систем, и параметры входного потока пакетов не влияют на очередность и время его обслуживания. Считаем также, что каждый поток характеризуется некоторым случайным количеством пакетов, т.е. его объем принимает только положительные дискретные значения, и это с большой долей вероятности отражает реальную ситуацию.

Конвейер адресации коммутатора состоит из одной или нескольких последовательно соединенных таблиц адресации. Входной сетевой трафик, описываемый произвольным законом распределения, поступает на конвейер и последовательно обрабатывается k таблицами адресации.

Предполагается, что время обработки запросов каждой таблицей случайно и подчиняется экспоненциальному закону. Сумма времен всех пройденных этапов обработки формирует итоговое распределение времени обслуживания (распределение Эрланга k -го порядка). Известно, что поток Эрланга k -го порядка с параметрами (μ, r) можно представить в виде суммы r случайных потоков с параметрами μ_i , а характеристики рассматриваемой системы можно получить из характеристик составляющих ее элементов [6]. Тогда стационарные вероятности $p(i_1, \dots, i_r)$ рассматриваемой системы:

$$p(i_1, \dots, i_r) = \prod_{k=1}^r \lim_{t \rightarrow \infty} p\{i_k(t) = i_k\}.$$

Структура набора записей коммутатора приведена на рис. 1.

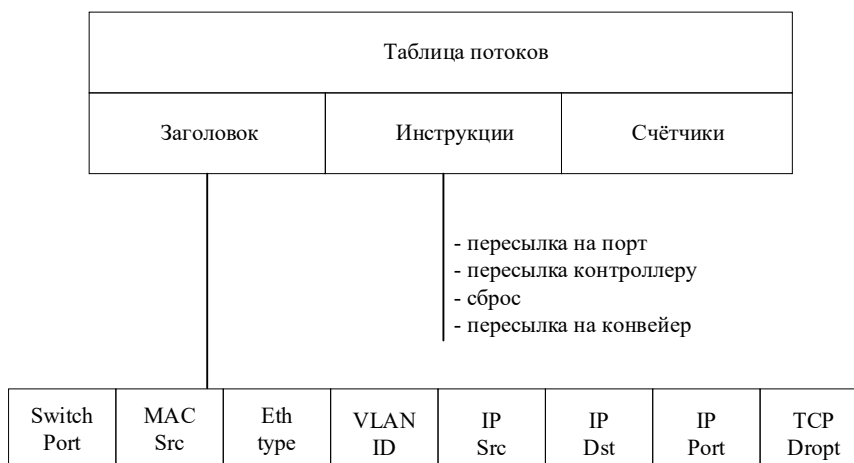


Рис. 1. Структура набора записей коммутатора

Упрощенная структура OpenFlow коммутатора представлена на рис. 2.

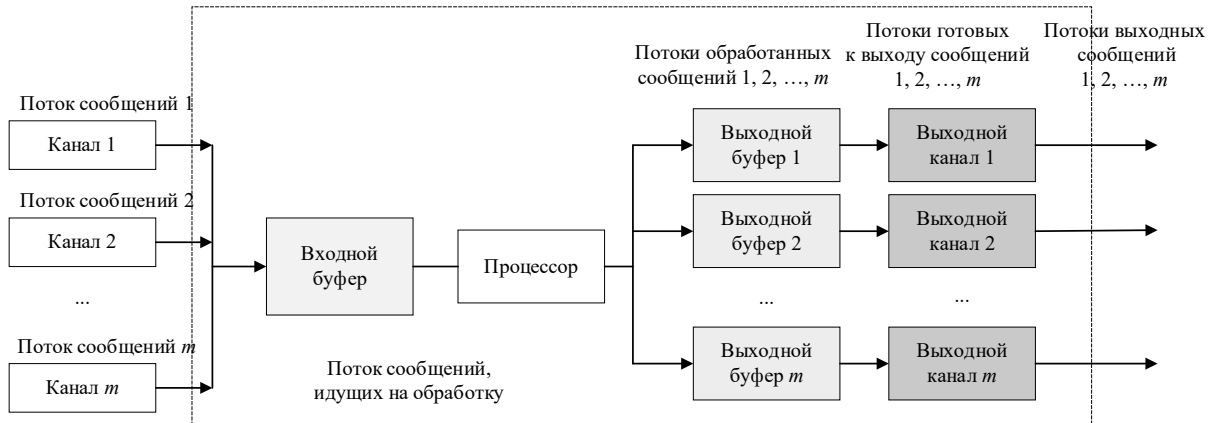


Рис. 2. Структура OpenFlow коммутатора

Временные интервалы между пакетами случайны. Входной поток является марковским, но время его обслуживания не подчиняется экспоненциальному распределению, т.е. анализируемый процесс обработки входных потоков содержит марковскую составляющую. Значит, данную систему можно исследовать с помощью математического аппарата полумарковских процессов [7], а функция распределения временных интервалов нахождения процесса в состоянии i будет произвольно распределенной случайной величиной [8]. Такому же распределению подчиняются промежутки между моментами окончания обслуживания и очередными моментами поступления запросов на обслуживание. Считаем также, что случайные потоки пакетов, определяемые функцией распределения Эрланга, поступают по m каналам с интенсивностями $a_i (i = \overline{1, m})$, $\lambda = \sum_{i=1}^m a_i$.

Для системы $M/G/1/n$ преобразование Лапласа-Стилтьеса функции распределения объема обслуживаемого пакета $R(x)$:

Здесь $g_i > 0$ — время задержки приема пакета по i -му каналу, f — параметр распределения, s — комплексный параметр преобразования Лапласа-Стилтьеса. В данном выражении он выполняет функцию множителя в показателе экспоненты и позволяет находить моменты распределения случайной величины любой степени.

$$l_i(s) = 1 - \frac{a_i}{g_i} \left[\frac{1}{f} - \frac{f}{(s+f)^2} \right].$$

Среднее значение и дисперсия:

$$l_{1i} = \frac{2a_i}{g_i f^2} = \frac{2\rho_i}{f}, l_{2i} = \frac{2a_i}{g_i f^3} = \frac{6\rho_i}{f^2},$$

где ρ_i — загрузка входного канала, $(l_{2i} - l_{1i}^2) = \frac{2\rho_i}{f^2} (3 - 2\rho_i)$.

Тогда ПЛС объема потока пакетов:

$$\delta(s) = \prod_{i=1}^m \left\{ 1 - \frac{a_i}{g_i} \left[\frac{1}{f} + \frac{f}{(s+f)^2} \right] \right\}.$$

Средние значения и дисперсия:

$$\delta_1 = \frac{2}{f} \sum_{i=1}^m \rho_i, (\delta_2 - \delta_1^2) = \frac{2}{f^2} \sum_{i=1}^m \rho_i (3 - 2\rho_i).$$

Считаем, что вероятность потерь потока пакетов [9]:

$$\rho_{\Pi} = 1 - R(V),$$

где $R(V) = \int_0^V D(V-x) dL(x)$, $L(x) = 1 - e^{-fx}$ — функция распределения (ФР) объема потока пакетов;

$D(x) = p(\delta < x)$ — ФР суммарного объема потока пакетов δ .

Моменты ФР $R(x)$:

$$r_1 = \delta_1 + \varphi_1, r_2 = \varphi_2 + 2\varphi_1\delta_1 + \delta_2,$$

где $\varphi_1 = 1/f$ — средний объем потока пакетов; δ_1, δ_2 — моменты суммарного объема потока пакетов.

Нахождение явного вида ФР $D(x)$ не представляется возможным. В [10] показано, что при проведении расчетов эту функцию можно достаточно точно аппроксимировать выражением:

$$D(V) = p_0 + (1 - p_0) \frac{\gamma(p, gx)}{\Gamma(p)}.$$

Здесь $\gamma(p, gx) = \int_0^{gx} t^{p-1} e^{-t} dt$ — неполная гамма-функция; p_0 — вероятность отсутствия запросов на обслуживание;

$\Gamma(p) = \gamma(p, \infty)$ — гамма-функция; p и g — параметры, определяемые из условия равенства соответствующих моментов объема памяти коммутатора:

$$p = \frac{r_1^2}{r_2 - r_1^2}, \quad g = \frac{r_1}{r_2 - r_1^2}.$$

Числовые значения ФР $D(x)$ получены путем имитационного моделирования с использованием стандартных численных методов, которые позволили свести решение задачи к выполнению конечного количества арифметических действий. Итоги имитационного моделирования практически совпадают с результатами аналитического моделирования, описанного в данной статье, что говорит о достоверности разработанной модели.

При формировании сетевых потоков выполняются перечисленные ниже действия [11].

1. Идентификация потока пакетов трафика.
2. Определение принадлежности пакета к формируемому потоку.
3. Формирование сетевых потоков пакетов или передача неидентифицированного пакета управляющему контроллеру.

Функция распределения времени обслуживания входного потока пакетов $B(t) = p + (1 - p)(1 - e^{-pt})$, а ее ПЛС [12]:

$$\beta(q) = p + \frac{(1 - p)p}{p + g} = \frac{p(1 + q)}{p + g}.$$

Среднее значение времени обслуживания:

$$\beta_1 = -\beta'(0) = \frac{1 - p}{p}.$$

Если загрузка системы $\rho = a\beta_1 = a(1 - p)/p$, то ПЛС времени ожидания обслуживания:

$$W(q) = \frac{(1 - \rho)(p + q)}{p + q - a(1 - p)} = \frac{(1 - \rho)(p + q)}{q + p(1 - \rho)}.$$

Тогда среднее значение времени ожидания: $W_1 = -W'(0) = \frac{\rho}{p(1 - \rho)}$.

Изображение имеет вид рациональной дроби $(A_n(p))/(B_n(p))$. P_1, P_2, \dots, P_n — корни кратности r_1, r_2, \dots, r_n , причем $r_1 + r_2 + \dots + r_n = m$ и $B_m(p) = \beta_0 (p - P_1)^{r_1} (p - P_2)^{r_2} \dots (p - P_n)^{r_n}$. Значит, оригинал можно найти по формуле [13]:

$$f(t) = \sum \operatorname{Res} \left[\frac{A_n(p) e^{pt}}{B_m(p)} \right].$$

При простых корнях знаменателя P_1, P_2, \dots, P_n :

$$f(t) = \sum \frac{A_n(P_k)}{B_m(P_k)} e^{P_k t}.$$

Обращение ПЛС функции $W(q)$ определяется соотношением:

$$W(t) = \sum \operatorname{Res} \left[\frac{(1 - \rho)(p + q)}{q(q + p(1 - \rho))} e^{qt} \right].$$

Функция распределения случайной величины V имеет вид:

$$V(t) = p \{V < t\} = \int_0^t W(t - u) dU = 1 - e^{-(1 - \rho)\mu t}.$$

Для случая $p \{W > 0\} = 1 - W(0) = \frac{(n\rho)^n p_0}{n!(1 - \rho)}$ среднее значение стационарного времени ожидания:

$$W_1 = EW = \int_0^\infty dW(t) = \frac{n^{n-2} \rho^n p_0}{\mu (1 - \rho)^2 (n - 1)!}.$$

Среднее значение стационарного времени обслуживания:

$$V_1 = EV = \int_0^{\infty} t dV(t) = \beta_1 + T_1 = \frac{1}{\mu} + \frac{n^{n-2} \rho^n p_0}{\mu (1-\rho)^2 (n-1)!}.$$

Данные случайные величины аппроксимированы ФР $Z(x) = p_0 + (1-p_0) \frac{\gamma(p, gx)}{\Gamma(p)}$. Здесь $\gamma(p, gx) = \int_0^{gx} t^{p-1} e^{-t} dt$,

$\Gamma(p) = \gamma(p, \infty)$, p_0 — стационарная вероятность отсутствия требований:

$$p = \frac{\delta_1^2}{(1-p_0)\delta_2 - \delta_1^2}, \quad g = \frac{(1-p_0)\delta_1}{(1-p_0)\delta_2 - \delta_1^2}.$$

Очевидно, что фазы передачи выходящих из коммутатора сетевых пакетов можно описать графом (рис. 3) [14].

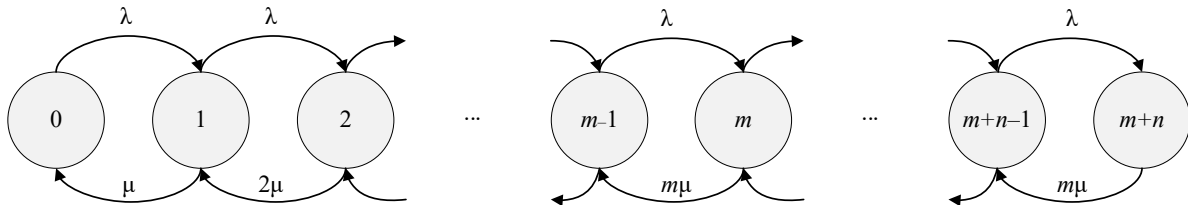


Рис. 3. Граф состояний и переходов СМО типа $M/M/m/n$

Из [15] известна вероятность нахождения системы $M/M/m/n$ в состоянии p_k :

$$p_k = \frac{\frac{\rho^k}{k!}}{\sum_{k=0}^m \frac{\rho^k}{k!} + \frac{\rho^{m+1}}{m!} - \frac{1 - \left(\frac{\rho}{m}\right)^n}{1 - \frac{\rho}{m}}}, \quad 0 \leq k \leq m.$$

Здесь $\rho = \lambda/\mu$ — нагрузка.

Соответственно, вероятность состояния p_{m+s} :

$$p_{m+s} = \frac{\frac{\rho^m}{m!} \left(\frac{\rho}{m}\right)^s}{\sum_{k=0}^m \frac{\rho^k}{k!} + \frac{\rho^{m+1}}{m!} - \frac{1 - \left(\frac{\rho}{m}\right)^n}{1 - \frac{\rho}{m}}}, \quad 0 \leq s \leq n.$$

Тогда интенсивность выходного потока: $y = \lambda - \lambda p_{m+n} = \lambda \sum_{i=0}^{m+n-1} p_i$.

$$p_0 = \frac{\rho}{\sum_{k=0}^m \frac{\rho^k}{k!} + \frac{\rho^{m+1}}{m!} - \frac{1 - \left(\frac{\rho}{m}\right)^n}{1 - \frac{\rho}{m}}},$$

$$p_{m+n} = \frac{\frac{\rho^m}{m!} \left(\frac{\rho}{m}\right)^n}{\sum_{k=0}^m \frac{\rho^k}{k!} + \frac{\rho^{m+1}}{m!} - \frac{1 - \left(\frac{\rho}{m}\right)^n}{1 - \frac{\rho}{m}}} = \frac{\rho^m}{m!} \left(\frac{\rho}{m}\right)^n p_0.$$

Согласно [16], с учетом потерянных пакетов интенсивность выходного потока:

$$y = \lambda(1 - p_{m+n}) = \lambda \left(1 - \frac{\frac{\rho^m}{m!} \left(\frac{\rho}{m}\right)^n}{\rho} p_0 \right) = \lambda \frac{\rho - \frac{\rho^m}{m!} \left(\frac{\rho}{m}\right)^n}{\rho} p_0.$$

Время пребывания пакетов в системе:

$$V = \frac{N}{m\mu(1-p_0)} = \frac{\sum_{k=0}^{m+n} kp_k}{m\mu(1-p_0)}.$$

Время ожидания пакетов в очереди:

$$W = \frac{N_0}{m\mu(1-p_0)} = \frac{\sum_{k=m+1}^{m+n} (k-m)p_k}{m\mu(1-p_0)}.$$

Время обслуживания:

$$T_{об} = V - W = \frac{\sum_{k=0}^{m+n} kp_k}{m\mu(1-p_0)} - \frac{\sum_{k=m+1}^{m+n} (k-m)p_k}{m\mu(1-p_0)} = \frac{1}{m\mu} + \frac{(m-1)\sum_{k=m}^{m+n} p_k + \sum_{k=2}^{m-1} (k-1)p_k}{m\mu(1-p_0)}.$$

Представленные выражения дают возможность получить основные характеристики коммутатора OpenFlow. В этом случае принимаются во внимание обработка и управление потоками пакетов, а также взаимодействие с центральным сетевым контроллером. При этом буферная память считается общим, динамически распределяемым ресурсом и определяется с учетом ограничений на долю потерянных пакетов при заданной вероятности потерь. Допустимые ограничения модели:

- произвольное распределение зависимости между объемом потоков данных и временем их обслуживания;
- предполагаемая дискретность распределения структуры информационных потоков.

Результаты исследования. Итак, в рамках данного исследования разработана модель коммутатора OpenFlow для расчета и оценки его буферной памяти. С использованием математического аппарата полумарковских процессов и преобразований Лапласа-Стилтьеса задаются:

- вероятность потери потоков пакетов;
- их статистические характеристики;
- пропускная способность вычислительных устройств.

Обработка потоков пакетов состоит из множества независимых последовательных фаз, и время обслуживания на них распределено экспоненциально. Поэтому в основу предлагаемой модели положена процедура многофазного обслуживания, при которой время обслуживания определяется распределением Эрланга n -го порядка, а моменты функций распределения находятся преобразованием Лапласа-Стилтьеса.

В таблицах 1, 2 представлены результаты аналитического моделирования объема буферной памяти коммутатора и зависимости среднего времени ожидания обслуживания от загрузки. В данном случае она увеличивается от 0,1 до 0,9. Объем памяти коммутатора измеряется числом средних объемов входных потоков пакетов.

Таблица 1

Зависимость объема буферной памяти от загрузки коммутатора

Вероятность потери, p_n	Загрузка буферной памяти коммутатора, ρ								
	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9
10^{-3}	0,201	0,307	0,412	0,478	0,617	37,05	69,07	94,36	178,87
10^{-4}	0,403	0,481	0,521	0,680	2,15	4,31	21,05	232,7	831,3
10^{-5}	0,762	0,790	0,840	0,932	3,76	7,83	16,07	476,5	983,2
10^{-6}	0,937	0,951	1,511	1,79	5,07	16,08	87,13	748,1	10564

Таблица 2

Зависимость среднего времени ожидания от загрузки коммутатора, мс

Вероятность потери, p_n	Загрузка буферной памяти коммутатора, ρ								
	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9
10^{-4}	0,00	0,00	0,00	0,02	0,07	0,17	30	120	470
10^{-4}	0,00*	0,00*	0,01*	0,04*	0,12*	0,53*	90*	510*	2300*

Примечание: * Помечены результаты имитационного моделирования коммутатора.

Результаты имитационного моделирования получены при использовании самоподобного сетевого трафика, описываемого распределением Парето с параметром 1,5. Если загрузка системы менее 50 %, то полученные при имитационном моделировании характеристики для системы $P/G/1$ незначительно отклоняются от средних показателей, полученных при аналитическом моделировании. При загрузке более 50 % значения увеличиваются в нескольких раз. Показатели резко возрастают с загрузкой коммутатора до 70 % и кратно увеличиваются, если этот уровень превышает.

Обсуждение. Результаты данной научной работы получены при условии независимости функции распределения интенсивности потока пакетов от обрабатываемой их фазы, а также постоянного характера объема потока пакетов. Только в этом случае будет справедлив итог преобразования Лапласа-Стилтьеса для объема памяти коммутатора.

Основной недостаток результатов заключается в том, что полученные оценки достоверны только на уровне частных распределений. Модель сетевого коммутатора OpenFlow построена в предположении использования общей динамически распределяемой буферной памяти, а рассматриваемые фазы обработки потоков заявок считаются независимыми, поэтому итоги исследования можно использовать только при равенстве времени:

- ввода потока пакетов в память коммутатора;
- его вывода в канал связи.

Такие условия следует считать допустимыми, учитывая возможности современных средств обработки и передачи данных.

Результаты моделирования, приведенные в таблицах 1 и 2, получены с учетом заданных характеристик потерь и текущей сетевой загрузки. При невысокой загрузке очереди не переполняются, пакеты не теряются, сохраняются линейные зависимости. При средней, а тем более высокой загрузке процессы обработки сетевых потоков пакетов описываются уже нелинейными зависимостями. Причина расхождения результатов аналитического и имитационного моделирования — взрывообразный характер самоподобного сетевого трафика и достаточно приближенный характер его описания распределением Парето.

Очевидно, что целесообразность применения предложенной модели определяется текущей загруженностью коммутатора. Данную модель можно использовать в проектировании сетевых элементов программно конфигурируемых сетей для анализа их устойчивости при различных информационных воздействиях.

Итоги представленного исследования при загрузке до 50 % практически совпадают с результатами, полученными в рамках классических методов теории массового обслуживания [5]. Критические потери входных потоков пакетов начинаются при загрузке коммутатора 50 %. Дальнейшее увеличение загрузки не предусматривается, следовательно, не оцениваются ни поведение, ни устойчивость системы при более высокой загрузке.

Уровень работоспособности предложенной модели соответствует известным результатам имитационного моделирования с использованием самоподобного сетевого трафика, описываемым распределением Парето.

Заключение

1. Построена аналитическая модель буферной памяти OpenFlow коммутатора программно управляемой сети SDN, предназначенная для определения:

- средних значений и дисперсии общего объема буферной памяти коммутатора;
- объемов памяти для построения таблиц потоков адресации.

2. Получены аналитические выражения для определения следующих характеристик качества обслуживания коммутатора программно конфигурируемой сети:

- интенсивность выходного потока пакетов с учетом потерь;
- время пребывания пакетов в системе;
- время ожидания пакетов в очереди;
- время обслуживания;
- зависимость объема буферной памяти и среднего времени ожидания обслуживания от загрузки.

3. Работоспособность модели подтверждено сравнение результатов аналитического и имитационного моделирования при изменении загрузки коммутатора от 0,1 до 0,9.

4. Модель позволяет без использования физического оборудования тестировать сети SDN для обоснования параметров коммутатора с учетом его окружения.

Предполагается, что следующая статья, посвященная разработке модели функционирования коммутатора SDN, будет учитывать потоки заявок как из внешней сети, так и от управляющего контроллера (сервера).

Список литературы / References

1. Самуйлов К.Е., Шалимов И.А., Бужин И.Г., Миронов Ю.Б. Модель функционирования телекоммуникационного оборудования программно конфигурируемых сетей. *Современные информационные технологии и ИТ-образование*. 2018;14(1):13–26. <https://doi.org/10.25559/SITITO.14.201801.013-026>

Samouylov KE, Shalimov IA, Buzhin IG, Mironov YuB. Model of Functioning of Telecommunication Equipment for Software-Configured Networks. *Modern Information Technologies and IT-Education*. 2018;14(1):13–26. <https://doi.org/10.25559/SITITO.14.201801.013-026>

2. Ivanova D, Adou Y, Markova E, Gaidamaka Yu, Samouylov K. Mathematical Framework for Mixed Reservation- and Priority-Based Traffic Coexistence in 5G NR Systems. *Mathematics*. 2023;11(4):1046. <https://doi.org/10.3390/math11041046>
3. Баскаков А.Е., Волков А.С. Алгоритм управления ресурсами транспортной программно-конфигурируемой сети связи. *Труды МАИ*. 2020;(115). <https://doi.org/10.34759/trd-2020-115-06>
Baskakov AE, Volkov AS. Resources Managing Algorithm for Transport Software-Defined Communication Network *Trudy MAI*. 2020;(115). <https://doi.org/10.34759/trd-2020-115-06>
4. Stepanov MS, Stepanov SN, Kanischeva MG, Kroshin FS. Analysis of Procedures to Ensure the Required QoS Indicators in Multiservice Access Nodes. В: *Мат-лы XXVI Междунар. науч. конф. «Распределенные компьютерные и телекоммуникационные сети: управление, вычисление, связь (DCCN-2023)»*. Москва: Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова Российской академии наук; 2023. Вып. 1. С. 47–55. <https://doi.org/10.25728/dccn.2023.007>
Stepanov MS, Stepanov SN, Kanischeva MG, Kroshin FS. Analysis of Procedures to Ensure the Required QoS Indicators in Multiservice Access Nodes. In: *Proceedings of the XXVI International Conference. on “Distributed Computer and Communication Networks: Control, Computation, Communications (DCCN)”*. Moscow: V.A. Trapeznikov Institute of Control Sciences, Russian Academy of Sciences; 2023. Iss. 1. P. 47–55.
5. Mochalov VP, Linets GI, Bratchenko NY, Govorova SV. An Analytical Model of a Corporate Software-Controlled Network Switch. *Scalable Computing: Practice and Experience*. 2020;21(2):337–346. <https://doi.org/10.12694/scpe.v21i2.1698>
6. Малахов С.В., Якупов Д.О., Осипова А.А., Копылова Д.А., Зеленина Е.А. Применение системы массового обслуживания для исследования характеристик канала связи в IoT-сетях. *Вестник НГУ. Серия: Информационные технологии*. 2024;22(1):49–61. <https://doi.org/10.25205/1818-7900-2024-22-1-49-61>
Malakhov SV, Yakupov DO, Osipova AA, Kopylova DA, Zelenina EA. The Use of a Queuing System to Study the Characteristics of the Communication Channel in IoT Networks. *Vestnik NSU. Series: Information Technologies*. 2024;22(1):49–61. <https://doi.org/10.25205/1818-7900-2024-22-1-49-61>
7. Tikhonenko OM. Generalized Erlang Problem for Service Systems with Finite Total Capacity. *Communication Network Theory*. 2005;41:243–253. <https://doi.org/10.1007/s11122-005-0029-z>
8. Антонова П.В. Принципы разработки систем массового обслуживания с ограниченной очередью на платформе NET. *Программные системы и вычислительные методы*. 2023;(2):15–28. <https://doi.org/10.7256/2454-0714.2023.2.43403>
Antonova PV. Principles of Developing a Limited-Queue Mass Service System on the .NET Platform. *Software Systems and Computational Methods*. 2023;(2):15–28. <https://doi.org/10.7256/2454-0714.2023.2.43403>
9. Voronova AG. Typification of Projects for the Transition to Cloud Services. *Advanced Engineering Research (Rostov-on-Don)*. 2024;24(3):274–282. <https://doi.org/10.23947/2687-1653-2024-24-3-274-282>
10. Gorbunova AV, Lebedev AB. On Estimating the Characteristics of a Fork-Join Queueing System with Poisson Input and Exponential Service Times. *Advances in Systems Science and Applications*. 2023;23(2):99–114. <https://doi.org/10.25728/assa.2023.23.2.1351>
11. Мочалов В.П., Братченко Н.Ю., Моисеенко В.А., Гостева Д.В. *Имитационная модель алгоритмов функционирования узлов будущих сетей связи*. RU2019618220. Государственная регистрация программы для ЭВМ. 2019. Федеральная служба по интеллектуальной собственности. Бюл. № 7. URL: https://new.fips.ru/register-doc-view/fips_servlet?DB=EVM&DocNumber=2019618220&TypeFile=html (дата обращения: 09.06.2026).
Mochalov VP, Bratchenko NYu, Moiseenko VA, Gosteva DV. *A Simulation Model of Algorithms for the Operation of Nodes of Future Communication Networks*. Certificate of Software State Registration no. 2019618220, 2019. (In Russ.) URL: https://new.fips.ru/register-doc-view/fips_servlet?DB=EVM&DocNumber=2019618220&TypeFile=html (accessed: 09.06.2026.)
12. Topilin IV, Han M, Feofilova AA, Beskopylny NA. Comparative Analysis of Neural Network and Machine Learning Models for Short-Term Traffic Flow Prediction on Shenzhen Expressway. *Advanced Engineering Research (Rostov-on-Don)*. 2025;25(4):350–362. <https://doi.org/10.23947/2687-1653-2025-25-4-2215>
13. Горбунова А.В. Об особенностях управления скоростью обслуживания в fork-join системах с распределением Парето времени обслуживания. *Вестник Воронежского государственного университета. Серия: Системный анализ и информационные технологии*. 2025;(4):53–62. <https://doi.org/10.17308/sait/1995-5499/2024/4/53-62>
Gorbunova AV. On the Features of Service Speed Control in Fork-Join Systems with Pareto Distribution of Service Time. *Proceedings of Voronezh State University. Series: Systems Analysis and Information Technologies*. 2025;(4):53–62. <https://doi.org/10.17308/sait/1995-5499/2024/4/53-62>
14. Dudin SA, Dudin AN, Dudina OS, Chakravarthy SR. Analysis of a Tandem Queueing System with Blocking and Group Service in the Second Node. *International Journal of Systems Science: Operations and Logistics*. 2023;10(1):2235270. <https://doi.org/10.1080/23302674.2023.2235270>
15. Samoilenko VV. Concept of a Multilevel Network Infrastructure for Monitoring Agricultural Facilities Based on Wireless Sensor Networks. *Advanced Engineering Research (Rostov-on-Don)*. 2025;25(4):371–382. <https://doi.org/10.23947/2687-1653-2025-25-4-2238>

16. Горбунова А.В., Лебедев А.В. Об особенностях управления скоростью обслуживания в системах с разделением и параллельным обслуживанием заявок. *Автоматика и телемеханика*. 2024;12:70–88. <https://doi.org/10.31857/S0005231024120048>

Gorbunova AV, Lebedev AV. On the Features of Service Rate Control in Fork-Join Queueing System. *Automation and Remote Control*. 2024;85(12):70–88. <https://doi.org/10.31857/S0005231024120048>

Об авторах:

Геннадий Васильевич Слюсарев, доктор технических наук, ведущий научный сотрудник департамента науки, профессор департамента «Строительная инженерия и прототипирование» института перспективной инженерии Северо-Кавказского федерального университета (355029, Российская Федерация, г. Ставрополь, пр. Кулакова, 2), [SPIN-код](#), [ORCID](#), [ScopusID](#), [ResearchGate](#), gslusarev@ncfu.ru

Валерий Петрович Мочалов, доктор технических наук, профессор департамента «Цифровые, робототехнические системы и электроника» института перспективной инженерии Северо-Кавказского федерального университета (355029, Российская Федерация, г. Ставрополь, пр. Кулакова, 2), [SPIN-код](#), [ORCID](#), [ScopusID](#), [ResearcherID](#), [ResearchGate](#), mochalov.valery2015@yandex.ru

Дарья Валерьевна Гостева, программист, Северо-Кавказский федеральный университет (355029, Российская Федерация, г. Ставрополь, проспект Кулакова, 2), [SPIN-код](#), [ORCID](#), [ScopusID](#), [ResearcherID](#), [ResearchGate](#), DVGus@yandex.ru

Заявленный вклад авторов:

Г.В. Слюсарев: разработка концепции.

В.П. Мочалов: административное руководство исследовательским проектом, написание рукописи – внесение замечаний и исправлений.

Д.В. Гостева: разработка программного обеспечения.

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

About the Authors:

Gennady V. Slyusarev, Dr.Sci. (Eng.), Leading Researcher of the Department of Science, Professor of the Department of Civil Engineering and Prototyping, Institute of Advanced Engineering, North-Caucasus Federal University (2, Kulakov Pr., Stavropol, 355029, Russian Federation), [SPIN-code](#), [ORCID](#), [ScopusID](#), [ResearchGate](#), gslusarev@ncfu.ru

Valery P. Mochalov, Dr.Sci. (Eng.), Professor of the Department of Digital, Robotic Systems and Electronics, Institute of Advanced Engineering, North-Caucasus Federal University (2, Kulakov Pr., Stavropol, 355029, Russian Federation), [SPIN-code](#), [ORCID](#), [ScopusID](#), [ResearcherID](#), [ResearchGate](#), mochalov.valery2015@yandex.ru

Dar'ya V. Gosteva, programmer, North-Caucasus Federal University (2, Kulakov Pr., Stavropol, 355029, Russian Federation), [SPIN-code](#), [ORCID](#), [ScopusID](#), [ResearcherID](#), [ResearchGate](#), DVGus@yandex.ru

Claimed Contributorship:

GV Slyusarev: conceptualization.

VP Mochalov: project administration, writing – review & editing.

DV Gosteva: software.

Conflict of Interest Statement: the authors declare no conflict of interest.

All authors have read and approved the final manuscript.

Поступила в редакцию / Received 26.02.2026

Поступила после рецензирования / Reviewed 01.04.2026

Принята к публикации / Accepted 17.05.2026

МАШИНОСТРОЕНИЕ И МАШИНОВЕДЕНИЕ

MACHINE BUILDING AND MACHINE SCIENCE



УДК 669.1:66.04

Оригинальное эмпирическое исследование

<https://doi.org/10.23947/2687-1653-2026-26-2-2170>

Устранение короблений при упрочняющей термической обработке мелких стержневых изделий

В.Н. Пустовойт , Ю.В. Долгачев  

Донской государственный технический университет, г. Ростов-на-Дону, Российская Федерация

✉ ydolgachev@donstu.ru

EDN: HZFVXR

Аннотация

Введение. Стержневые изделия, например всевозможные иглы, оси, штифты, валы, шпильки, плунжеры и др., широко востребованы в современной промышленности. В технологическом процессе производства мелких длиннономерных изделий существует проблема искажения их форм вследствие действия внутренних напряжений, вызванных неравномерным нагревом, охлаждением, деформацией или фазовыми превращениями металла. Известные способы устранения коробления предполагают дополнительную механическую правку (зачастую ручным способом), что увеличивает трудоёмкость производства и себестоимость продукции, при этом снижаются эксплуатационные характеристики изделий. Чтобы избежать этого явления, предлагается использовать особенности технологии термической обработки в магнитном поле (ТОМП), которые обуславливают возможность зарождения мартенсита напряжения в температурном интервале сверхпластичности аустенита и одновременного заневоливания стержневого изделия вдоль магнитного потока. Таким образом, целью настоящей работы является исследование возможности уменьшения коробления продукции стержневой формы с помощью воздействия магнитным полем при термической обработке.

Возможности технологии ТОМП предлагается апробировать на машинных иглах, в качестве критерия коробления которых выступает величина остаточной деформации, а основными показателями свойств являются твёрдость и предел выносливости. Исследование игл проведено в процессе серийной и экспериментальной технологии обработки, в том числе между различными операциями технологического процесса.

Материалы и методы. Изучались машинные иглы из стали У10А диаметром 0,65, 0,75, 1,10 и 1,20 мм. Применялись стандартные режимы обработки и обработка ТОМП на специальной установке. Измерялась величина радиального биения. Исследовалась тонкая структура с помощью ПЭМ и рентгеновской дифрактометрии. Эксплуатационные характеристики оценивались усталостными испытаниями с определением предела выносливости.

Результаты исследования. Получены данные о распределении радиальных биений и углов отклонения острия игл после обычной закалки и низкого отпуска, а также после ТОМП и низкого отпуска. Дана оценка эксплуатационным характеристикам (пределу выносливости) игл с различным короблением после стандартной обработки и после ТОМП. Представлены изменения параметров тонкой структуры мартенсита после закалки в магнитном поле, анализ дисперсности структуры мартенсита (пакетной и двойниковой морфологии) после обычной закалки и ТОМП. Показаны изменения твердости по длине иглы после различных режимов обработки.

Обсуждение. Результаты проведенных экспериментов свидетельствуют о возможности устранения коробления мелких стержневых деталей при использовании упрочняющей технологии ТОМП. Закалка в магнитном поле сопровождается своеобразной внутренней правкой и заневоливанием длинной оси изделия в вертикальном положении вдоль линий магнитного потока.

Заключение. Опытным путем получены свидетельства того, что упрочняющая технология ТОМП, основанная на закалке стали в магнитном поле, позволяет дополнительно устранять радиальные биения изделий стержневой формы. В процессе внутренней рихтовки, которая реализуется особой схемой обработки ТОМП, исключается необходимость обычной мехобработки, снижающей эксплуатационные характеристики изделия.

Ключевые слова: мелкие стержневые изделия, иглы, инструментальная сталь, коробление, закалка в магнитном поле, радиальные биения

Благодарности. Авторы благодарят редакцию журнала за ценные замечания по содержанию статьи, сотрудников кафедры «Материаловедение и технологии металлов» ДГТУ, профессора Ю.М. Домбровского и заведующего кафедрой М.С. Егорова за помощь в получении и обсуждении результатов исследования.

Для цитирования. Пустовойт В.Н., Долгачев Ю.В. Устранение короблений при упрочняющей термической обработке мелких стержневых изделий. *Advanced Engineering Research (Rostov-on-Don)*. 2026;26(2):2170. <https://doi.org/10.23947/2687-1653-2026-26-2-2170>

Original Empirical Research

Elimination of Distortion during Strengthening Heat Treatment of Small Rod Products

Viktor N. Pustovoi^{ID}, Yuri V. Dolgachev^{ID}✉

Don State Technical University, Rostov-on-Don, Russian Federation

✉ ydolgachev@donstu.ru

Abstract

Introduction. Rod-shaped products, such as various needles, axles, pins, shafts, studs, plungers, etc., are in high demand in modern industry. In production of small long products, distortion of their shapes due to the action of internal stresses caused by uneven heating, cooling, deformation or phase transformations of the metal, is a pressing issue. Known methods for eliminating warping involve additional mechanical straightening (often manual), which increases labor intensity and product costs while reducing product performance. To avoid this phenomenon, the use of magnetic field heat treatment (MFHT) technology is proposed. This technology facilitates the initiation of stress-induced martensite within the superplastic temperature range of austenite, along with the simultaneous constraint of the rod product along the magnetic flux. Therefore, the objective of the present study is to explore the feasibility of reducing distortion in rod-shaped products by applying a magnetic field during heat treatment. It is proposed to test the capabilities of MFHT technology on machine needles, where the warping criterion is the magnitude of residual deformation, and the key property indicators are hardness and fatigue limit. The study involves testing needles during both serial and experimental processing, including between different process steps.

Materials and Methods. Machine needles made of U10A steel (GOST 1435-99) with diameters of 0.65 mm, 0.75 mm, 1.10 mm and 1.20 mm were studied. Standard processing modes and MFHT processing on a special installation were used. The radial runout value was measured. The fine structure was studied using TEM and X-ray diffractometry. The operational characteristics were assessed by fatigue tests with determination of the fatigue limit.

Results. The data on the distribution of radial runouts and deviation angles of the needle tip after conventional quenching and low tempering, as well as after MFHT and low tempering were obtained. The operational characteristics (fatigue limit) of needles with different warping after standard treatment and after MFHT were estimated. Changes in the parameters of the fine structure of martensite after quenching in a magnetic field were studied. The dispersion of the martensite structure (packet and twinned morphology) after conventional quenching and MFHT was analyzed. Data on the change in hardness along the length of the needle after various treatment modes were presented.

Discussion. Experimental data obtained demonstrate the feasibility of eliminating warping in small rod-shaped components using the MFHT hardening technology. Hardening in a magnetic field involves a kind of internal straightening and constraining of the long axis of the product in a vertical position along the magnetic flux lines.

Conclusion. Experimental evidence demonstrates that the hardening technology involving heat treatment in a magnetic field (MFHT), which relies on steel quenching under a magnetic field, can additionally eliminate radial runout in rod-shaped products. The internal straightening process, which is achieved using a specified MFHT processing scheme, eliminates the need for conventional machining, which reduces performance characteristics.

Keywords: small rod products, needles, tool steel, warping, magnetic field hardening, radial runout

Acknowledgements. The authors would like to thank the editorial board of the Journal for their valuable comments on the content of the article, the staff of the Department of Materials Science and Technology of Metals, DSTU, Professor Yu.M. Dombrovsky and Head of the Department M.S. Egorov for their help in obtaining and discussing the research results.

For Citation. Pustovoi VN, Dolgachev YuV. Elimination of Distortion during Strengthening Heat Treatment of Small Rod Products. *Advanced Engineering Research (Rostov-on-Don)*. 2026;26(2):2170. <https://doi.org/10.23947/2687-1653-2026-26-2-2170>

Введение. В современной промышленности широко востребованы различные изделия стержневой формы, имеющие соотношение (длина(L) / диаметр (D)) > 10 . Это всевозможные иглы (швейные, промышленные, медицинские), оси, штифты, валы, шпильки, плунжеры и др. Термическая обработка подобных изделий, применяемая для формирования необходимых свойств готовой продукции, сопряжена с сильным короблением [1, 2]. Данная

проблема решается последующими операциями рихтования и правки [3, 4]. Однако такой подход имеет свои недостатки. Во-первых, подобные процедуры достаточно трудозатратны, т. к. зачастую осуществляются вручную, что увеличивает себестоимость продукции (≥ 50 % от изначальной стоимости [5, 6]). А во-вторых, они могут оказывать негативное влияние на эксплуатационные свойства изделия, сокращая срок его службы [7, 8].

Для решения обозначенной проблемы предлагается использовать особенности технологии термической обработки в магнитном поле [9]. Под действием магнитного поля возможно зарождение мартенсита напряжения [10], что обуславливает возможность внутренней правки изделия за счёт воздействия в состоянии сверхпластичности [11, 12] и одновременного заневоливания обрабатываемого стержня вдоль вектора магнитного поля. Действие ТОМП (эффективность упрочнения $8 \div 12$ %) можно сравнить по характеру влияния с эффектом от высокотемпературной термомеханической обработки (ВТМО) ($19 \div 24$ %) [13, 14] в том смысле, что обеспечивается одновременное повышение показателей сопротивляемости пластической деформации и хрупкому разрушению. Известно, что при использовании ТОМП оптимальное сочетание свойств формируется при проведении закалки в магнитном поле с отпуском без поля [9].

Возможности технологии ТОМП предлагается апробировать на машинных иглах, в качестве критерия коробления которых выступает величина остаточной деформации (радиальные биения), а основными показателями свойств являются твёрдость и предел выносливости. Предполагается исследование игл в процессе серийной и экспериментальной технологии обработки, в том числе и между различными операциями технологического процесса.

Целью данной работы является исследование возможности уменьшения коробления изделий стержневой формы путем воздействия на него магнитным полем при термической обработке.

Материалы и методы. В качестве объекта исследования была использована продукция Артинского механического завода: по 100 шт. машинных игл (ГОСТ 22249-82) разного диаметра (0,65, 0,75, 1,10 и 1,20 мм) для каждого режима. Машинные иглы изготовлены из стальной игольной проволоки марки У10А (ГОСТ 1435-99). Химический состав этой проволоки приведён в таблице 1.

Таблица 1

Химический состав проволоки для изготовления игл

Номер партии	Диаметр, мм	C, %	Mn, %	Si, %	S, %	P, %
367	1,90	0,98	0,20	0,18	0,014	0,020
598	1,64	1,01	0,26	0,29	0,015	0,023
1239	2,04	1,01	0,27	0,28	0,013	0,016
471	2,04	1,03	0,27	0,29	0,016	0,021

Данные изделия в процессе производства претерпевают довольно много технологических переделов, что обусловлено особенностями их конструкции. Можно выделить следующие основные операции: механическая обработка, термическая обработка, финишные операции (хромирование). После всех операций формообразования иглы подвергаются термической обработке, имея исходную структуру зернистого перлита. Стандартный режим термической обработки предусматривает неполную закалку и низкий отпуск. Закалка проводилась в подогретом масле (~ 60 °С). После закалки твердость должна составлять $59 \div 63$ HRC. Отпуск выполнялся в масляных электрованнах при температуре $200 \div 225$ °С в течение 30 минут. Твердость стержня после отпуска составляла $53 \div 59$ HRC, а твердость колбы — не ниже 23 HRC.

ТОМП проводилась на лабораторной установке, описанной в [15]. Главная особенность установки заключается в том, что игла нагревается и удерживается в верхней части печи в вертикальном положении с помощью действия магнитного поля, создаваемого соленоидом. Когда температура иглы достигает ~ 745 °С, она теряет магнитные свойства и вертикально падает, одновременно нагреваясь в печи 780 °С, в закалочный бак. Здесь действует магнитное поле, которое способствует интенсивному образованию мартенсита и вертикальному заневоливанию изделия. Далее следует отпуск без магнитного поля. Как было показано в [9], наложение магнитного поля при отпуске заэвтектоидных сталей нецелесообразно, т. к. тормозит распад твёрдого раствора.

Для исследования особенностей тонкой структуры применялся электронный микроскоп «УЭМВ-100К» путём прямого просвечивания фольги и рентгеновский дифрактометр «ДРОН-0,5» с трубкой FeKa.

Степень коробления оценивалась величиной радиального биения, измерявшегося на микроскопах «ЕС МЕТАМ РВ-22» и «Микромед МС-2-Zoom вар.2CR» с цифровой окулярной насадкой Eakins и объект-микроскопом.

Измерения твердости проводились по методам Роквелла и Виккерса на приборах «ТК-2М» и «ИТБРВ-187,5-М» соответственно.

Усталостные испытания при поперечном изгибе были проведены с пульсирующей нагрузкой, создаваемой асинхронным электродвигателем. Предел выносливости определялся по методике В.С. Ивановой [16].

Для обработки массива полученных данных использовался пакет статистических функций MS Excel; гистограммы, диаграммы и графики также созданы в этой среде.

Результаты исследования. Стандартная обработка формирует структуру игл, которая определяет следующие свойства: предел выносливости $\sigma_{-1} = 480$ МПа, остаточная деформация $\Delta l_{\text{ост.}} \approx 0,15$ мм (для иглы $\varnothing 1,20$ мм). Чем меньше диаметр игл, тем меньше величина остаточной деформации после термической обработки, например, для $\varnothing 0,75$ мм она снижается до $\Delta l_{\text{ост.}} = 0,07 \div 0,08$ мм.

Важным эксплуатационным параметром иглы служит значение радиального биения (l) оси стрежня относительно оси колбы. Радиальные биения [17, 18] возникают из-за внутренних напряжений, обусловленных неравномерностями пластической деформации во время механообработки и распределения температуры при операциях термообработки. Радиальные биения устраняются на различных стадиях техпроцесса (редуцирование, фрезерование, пробивка отверстий, заточка, шлифовка, термообработка, гальванизация, полировка и т. д.) комплексом правильных операций. Поэтому для получения качественной продукции и уменьшения трудозатрат на её изготовление необходимо в техпроцессе исключить факторы, вызывающие радиальные биения.

Результаты распределения значений радиального биения игл (l) и углов (φ) отклонения их острия от вертикальной оси после обработки по стандартному режиму приведены на рис. 1 и 2.

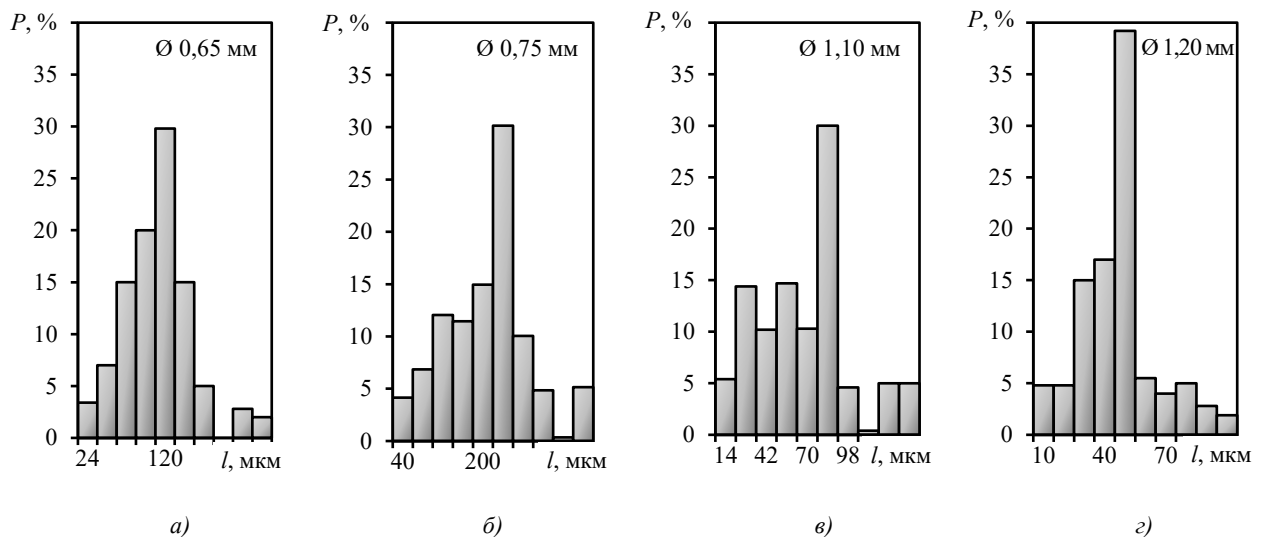
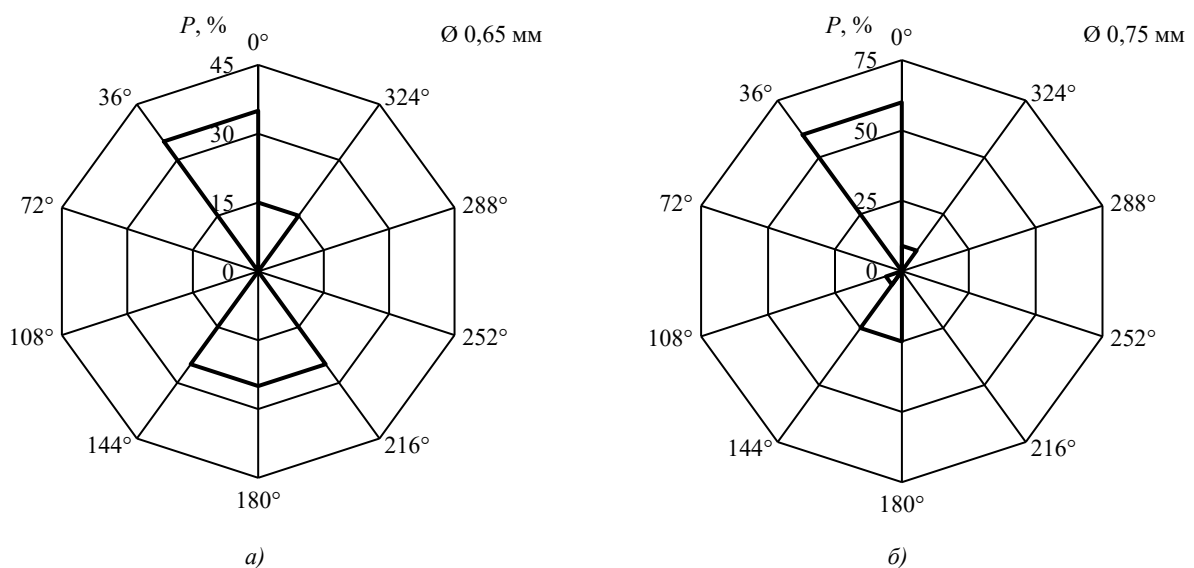


Рис. 1. Распределение радиальных биений (l) игл разного диаметра после закалки:
 а — $\varnothing 0,65$ мм; б — $\varnothing 0,75$ мм; в — $\varnothing 1,10$ мм; г — $\varnothing 1,20$ мм



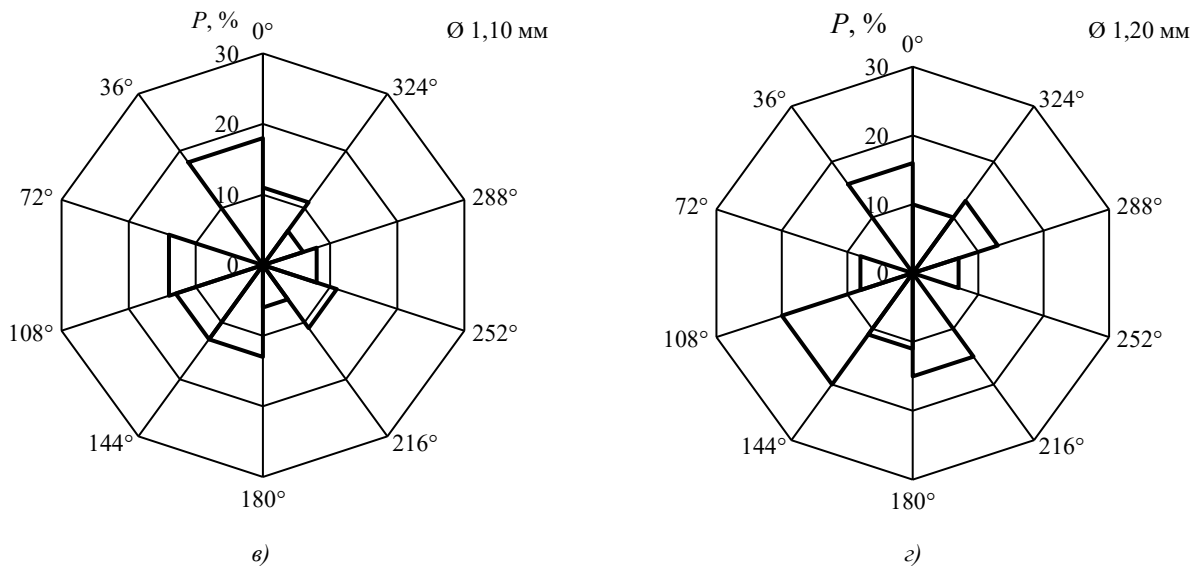


Рис. 2. Распределение углов (φ) отклонения острия игл разного диаметра от вертикальной оси (начало отсчёта от фрезерованного желобка) после закалки: *a* — \varnothing 0,65 мм; *б* — \varnothing 0,75 мм; *в* — \varnothing 1,10 мм; *г* — \varnothing 1,20 мм

После закалки изделий \varnothing 0,65 мм интервал разброса значений l был аналогичен полученным результатам после механической обработки и составлял $\sim 0,3$ мм, в то время как технические условия требуют для готовой продукции $l_0 \leq 0,1$ мм. Половина из 100 обработанных игл имела превышение по данному параметру. Можно отметить тенденцию отклонения (φ) стержня либо в сторону фрезерованного желобка (45 %), либо в противоположную (40 %). Такое поведение объясняется тем, что внутренние напряжения имеют преимущественную ориентировку, созданную операциями мехобработки (как предварительными, так и финишными). Закалочный нагрев не снимает все подобные напряжения, и они, аккумулируясь с термическими, в итоге создают наблюдаемое коробление.

Для диаметра \varnothing 0,75 мм наблюдается аналогичная картина: 60 % стержней отклоняются в область углов $\varphi = 0^\circ$, а 25 % — $\varphi = 180^\circ$; превышение коробления, допустимого для данного диаметра ($l_0 \leq 0,15$ мм), наблюдалось у 65 % образцов, максимальное значение $l = 0,4$ мм. Закалка изделий более крупного диаметра (\varnothing 1,10 мм, \varnothing 1,20 мм) приводила к получению максимального коробления ($l = 0,14$ и $0,10$ мм соответственно), удовлетворяющего требованиям технических условий ($l_0 \leq 0,15$ мм), а распределение углов отклонения острия (φ) было равновероятным.

Проведение отпуска способствует сужению интервала максимальных значений коробления l (рис. 3) на следующие величины: \varnothing 0,75 мм — 0,04 мм; \varnothing 1,10 мм — 0,02 мм. Для изделий меньших диаметров наблюдается двукратное увеличение доли продукции, проходящей по техническим условиям. Для \varnothing 1,10 мм (рис. 4) характерно равновероятное распределение φ , в то время как для \varnothing 0,75 мм оно имеет преимущественное направление: 30 % — $\varphi \approx 0^\circ$, 50 % — $\varphi \approx 180^\circ$.

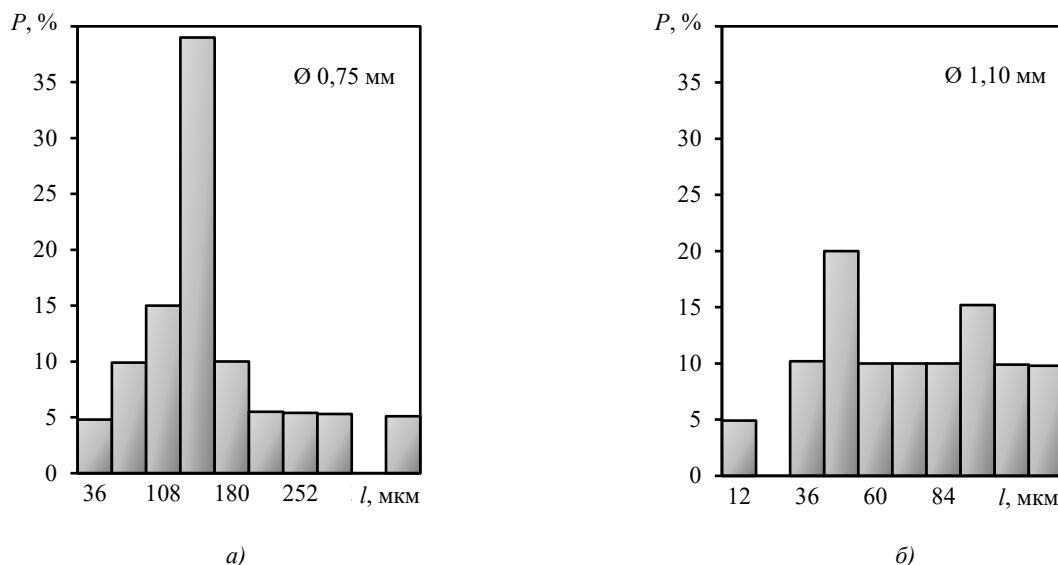


Рис. 3. Распределение величины коробления (l) после проведения низкого отпуска: *a* — \varnothing 0,75 мм; *б* — \varnothing 1,10 мм

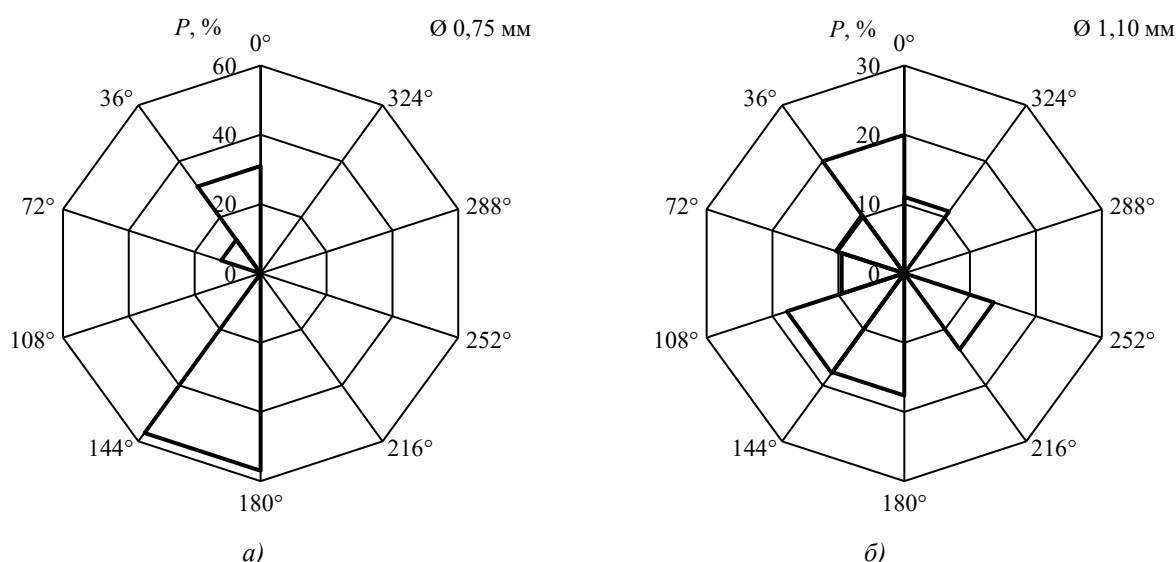


Рис. 4. Распределение углов (φ) отклонения острия игл разного диаметра от вертикальной оси (начало отсчёта от фрезерованного желобка) после отпуска: а — $\varnothing 0,75$ мм; б — $\varnothing 1,10$ мм

Выполненные исследования изделий с различным короблением позволили установить, что наилучшие эксплуатационные значения (σ_{-1} , $l_{ост.}$) имеет продукция, которая в процессе изготовления не имела либо имела минимальное коробление после термообработки и по этой причине не подвергалась правильным операциям (таблица 2).

Таблица 2

Эксплуатационные характеристики изделий $\varnothing 0,65$ мм с различным короблением

l , мкм	$l_{ост.}$, мм	σ_{-1} , МПа
0–20	0,02–0,08	460–480
0–20 (после правки)	0,16–0,24	420–440
80–100	0,32–0,36	400–420
180–200	0,34–0,40	370–410

При исследованиях морфологии [9, 10] не было выявлено качественной разницы между мартенситом напряжения и охлаждения, полученным в процессе закалки в магнитном поле и после обычной закалки. Как показали рентгеноструктурные исследования, влияние магнитного поля сводится в основном к увеличению объёмной доли V_{χ} χ -мартенсита (на 10 % при закалке с 1000 °С) и уменьшению тетрагональности α -мартенсита (рис. 5).

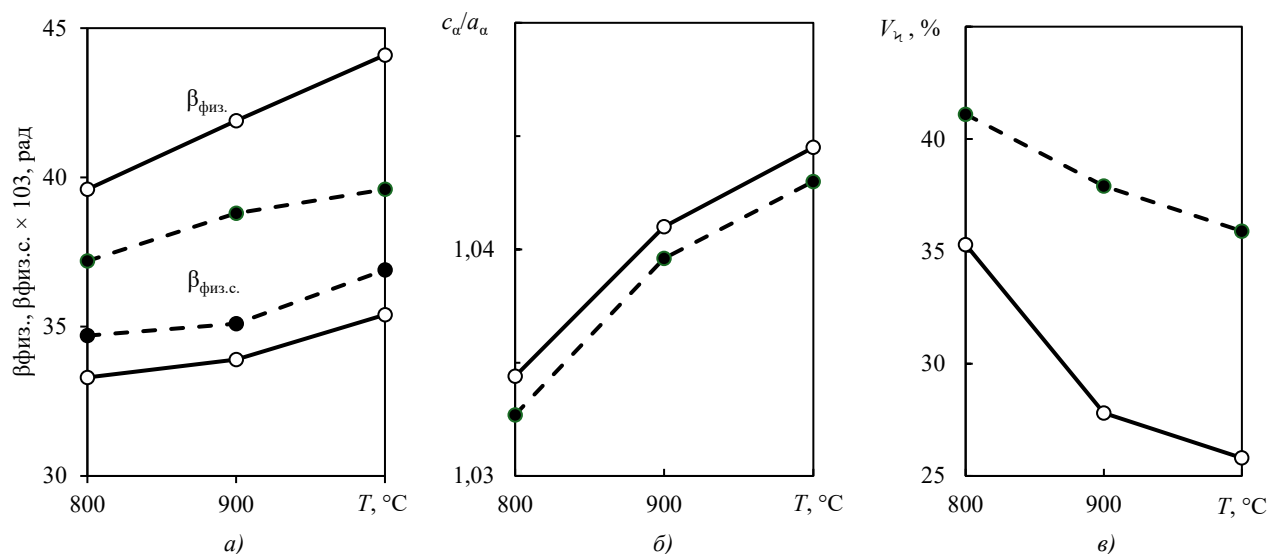


Рис. 5. Результаты рентгеноструктурных исследований параметров мартенсита стали У10 (сплошная линия — обычная закалка, штриховая линия — закалка в поле $H = 1,2$ МА/м): а — изменение физического профиля дифракционных линий; б — параметр тетрагональности α -мартенсита; в — объёмная доля χ -мартенсита

При закалке в магнитном поле, по сравнению с обычной закалкой, стабильно наблюдалось уширение мартенситного синглета $\beta_{\text{физ.с.}}$ из-за большего количества нарушений кристаллического строения. Под действием поля усиливается степень двухфазного распада, на что чётко указывает сокращающийся физический профиль мультиплета мартенситной рентгеновской дифракционной линии $\beta_{\text{физ.}}$.

Исследования на просвет металлической фольги показали, что образующийся мартенсит имеет смешанную морфологию (реечные+двойникованные кристаллы) при всех режимах обработки. Было установлено, что высокая плотность дефектов при закалке в поле объясняется повышенной дисперсностью продуктов мартенситной реакции. Результаты статистической оценки элементов тонкой структуры показаны на рис. 6. Влияние магнитного поля проявляется в том, что в пакетном мартенсите наблюдается измельчение (уменьшается количество крупных пакетов), размеры пакетов становятся более однородными, имеется тенденция к уменьшению толщины реек внутри пакетов, а также увеличивается доля самого пакетного мартенсита (на $12 \pm 4\%$). Изменения в морфологии обусловлены тем, что граница между разными типами мартенсита сдвигается в область с большей концентрацией углерода. Такие изменения объясняются взрывной кинетикой множественного появления мартенситных зародышей: охлаждения — в области старта мартенситного превращения, напряжения — в области сверхпластичности мартенситного превращения (несколько выше M_n). Дополнительно можно отметить, что под воздействием поля усиливается роль деформационного скольжения при зародышеобразовании α -фазы.

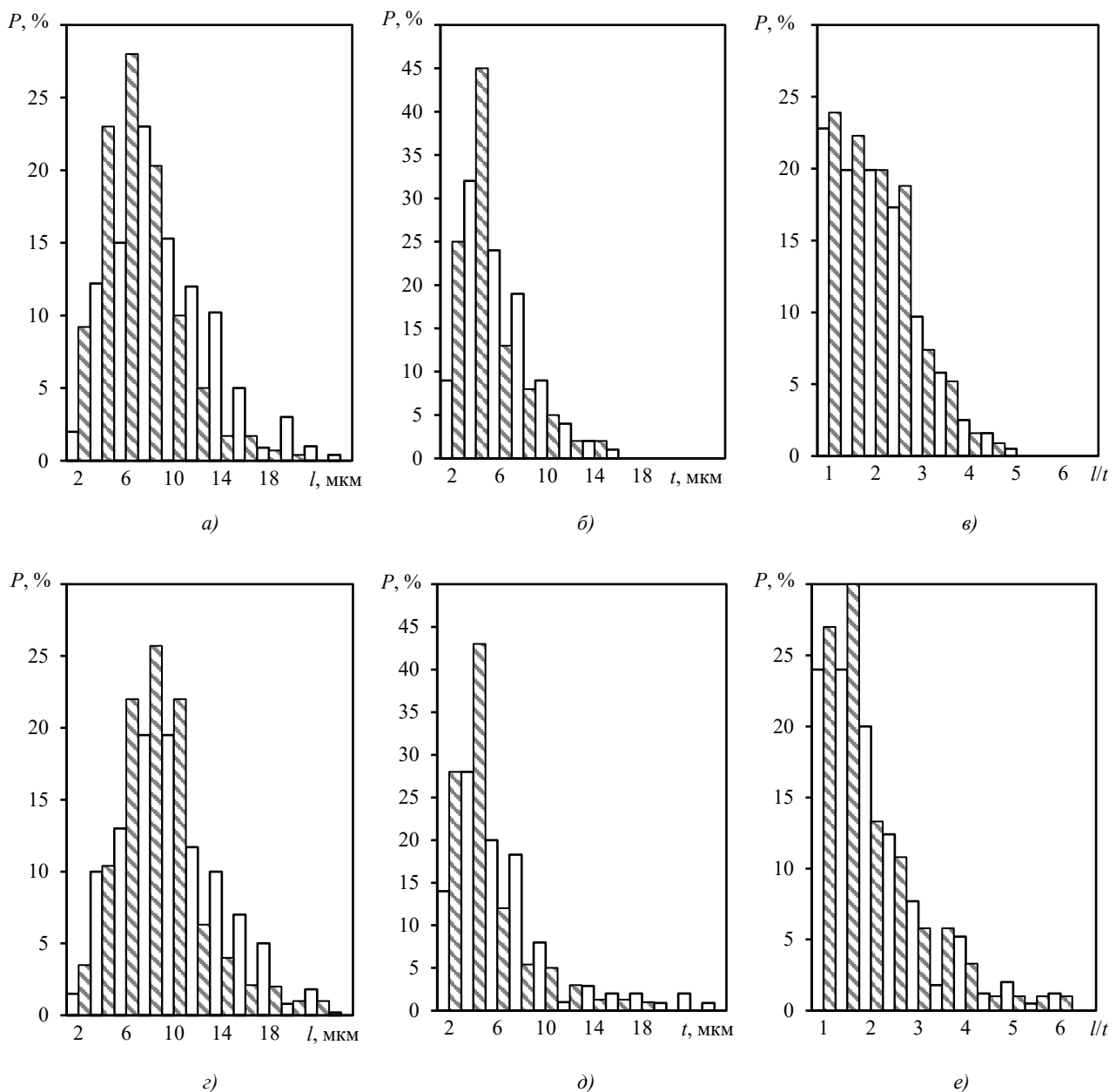


Рис. 6. Распределение длины (l), ширины (t) и формфактора (l/t) мартенсита стали У10А после обычной закалки (белые столбцы) и закалки в магнитном поле 1,6 МА/м (столбцы со штриховкой) для: а, б, в — мартенситных пакетов; г, д, е — двойникованных кристаллов мартенсита

Данные на рис. 6 свидетельствуют об измельчении областей с двойникованными кристаллами мартенсита при обработке в магнитном поле, но формфактор их остается без изменений. Повышение дисперсности также связано с каталитическим действием магнитного поля на множественное и повсеместное появление зародышей мартенсита, интенсифицируется появление мартенсита пакетной морфологии (образующегося при более высокой температуре [19, 20]), что вызывает явление наклепа γ -фазы.

Значения твердости после обработки в магнитном поле были всегда выше, чем при обработке без поля (рис. 7). Такие результаты объясняются уменьшением размерных параметров мартенситных кристаллов, снижением объёмных долей $A_{ост.}$ и других фаз (кроме мартенситной), протеканием дисперсионного твердения (в процессе закалки непосредственно происходит выделение промежуточного карбида [21, 22]). Исключение составляет твердость в районе колбы, которая падает при магнитной закалке, что объясняется интенсификацией протекания процесса самоотпуска [23, 24] в более крупной части изделия.

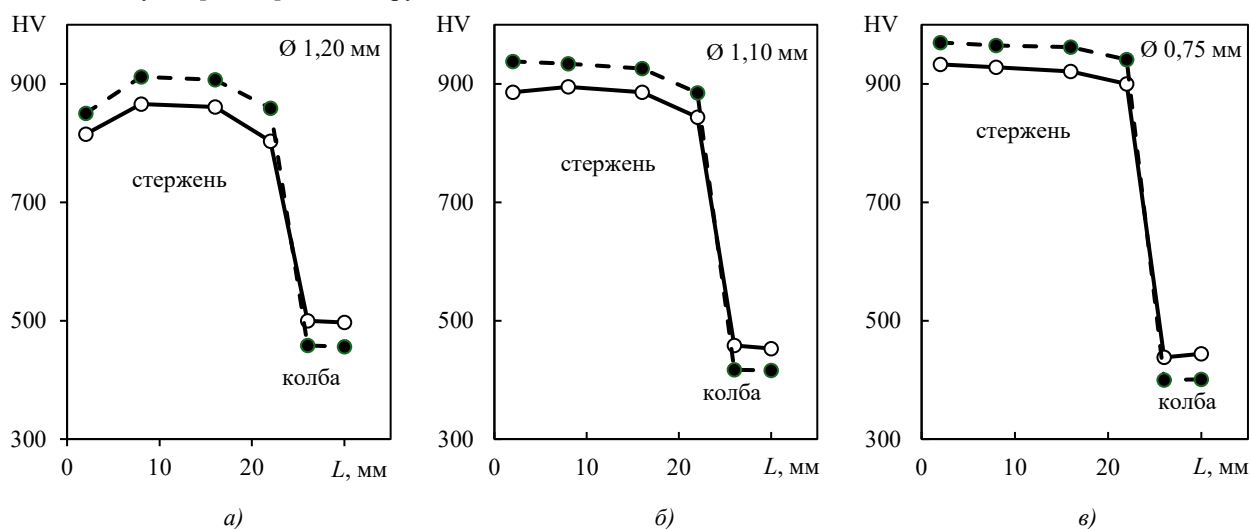


Рис. 7. Результаты измерения твёрдости игл по методу Вickers (обычная закалка — сплошная линия; закалка в магнитном поле $H = 0,8$ МА/м — штриховая линия): а — $\varnothing 1,20$ мм; б — $\varnothing 1,10$ мм; в — $\varnothing 0,75$ мм

Исследование величины l изделий после термообработки в магнитном поле показало отсутствие коробления, превышающего технические требования ($l < l_0$), а распределение углов φ было равновероятным для всех диаметров. Пример полученных данных для диаметра $\varnothing 0,65$ мм, имевшего наибольшее коробление при обработке по стандартному режиму, показан на рис. 8. Все иглы имели коробление $l < l_0/2$ ($l_0 = 0,1$ мм), а две трети игл удовлетворяли и условию $l < l_0/4$. Значения твёрдости иглы после закалки и отпуска принципиально не изменились, хотя и немного понизились (рис. 8 б).

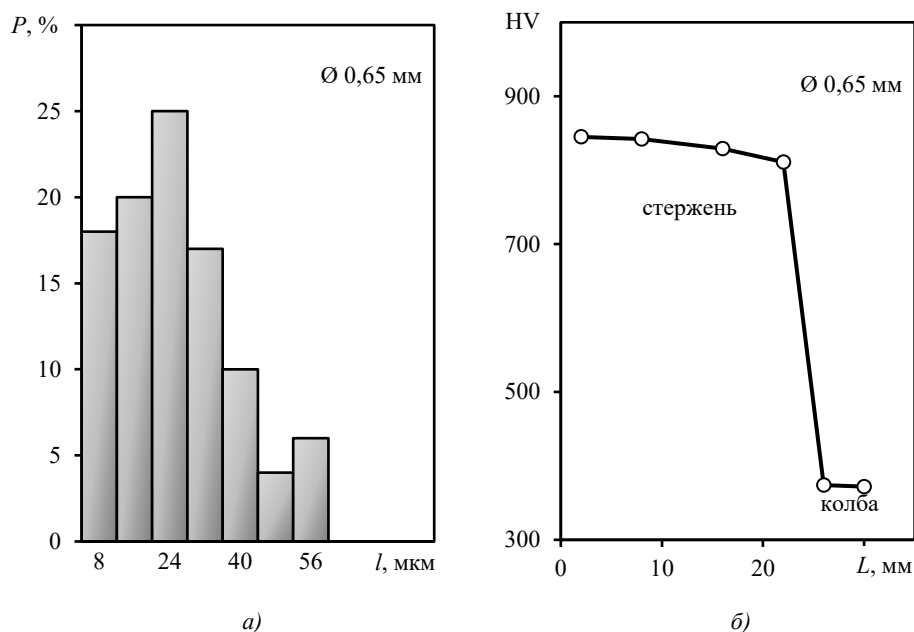


Рис. 8. Распределение значений для изделия после ТОМП и отпуска: а — величина коробления; б — твёрдость

В режиме обработки ТОМП промежуточные правильные операции не проводились. Следовательно, значительное уменьшение радиального биения происходит только от внутреннего воздействия в процессе ТОМП, где определяющую роль играют сверхпластичность [25], наблюдающаяся в стали немного выше точки начала мартенситного превращения, а также непосредственное заневоливание иглы вдоль вертикальной оси под действием магнитного потока, что определяется уже особенностями предлагаемой установки [15] для поштучной ТОМП деталей с соотношением $L/D > 10$.

Поскольку при ТОМП исключаются операции промежуточной рихтовки, то это сказывается на значении предела выносливости изделий. Исследованные значения σ_{-1} (рис. 9) для игл с радиальным биением $l \approx 25$ мкм были выше для всех диаметров, по сравнению со значениями, полученными после типовой обработки.

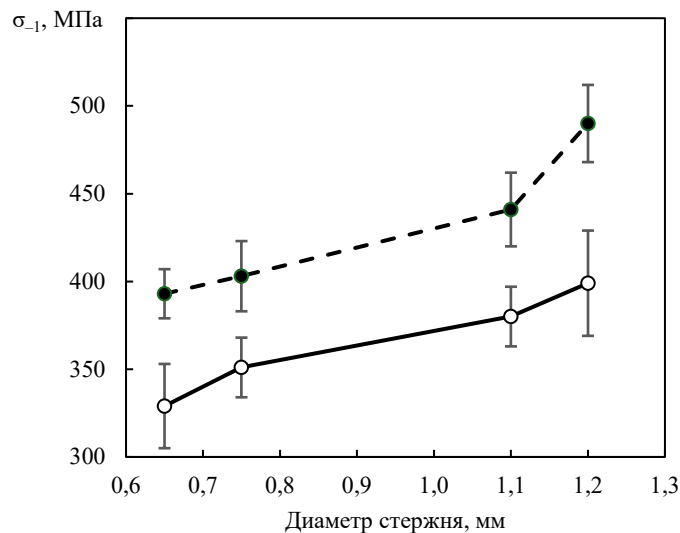


Рис. 9. Предел выносливости изделий с $l \approx 25$ мкм: стандартная обработка с операциями рихтования (сплошная линия); ТОМП (штриховая линия)

Обсуждение. Полученные данные (рис. 1, 2) указывают на несомненную связь искривления стержня с его жёсткостью. Иглы больших диаметров имеют и большую жёсткость стержня по отношению к колбе, что коррелирует с меньшей подверженностью короблению (главным образом связанным с фрезерованием желобка). Иглы крупных диаметров после мехобработки имели значения $l \leq l_0$, т.е. не превышали допустимых отклонений, а угловое распределение отклонений φ было равномерным по всем углам.

У изделий меньшего номера после закалки наблюдалось предпочтительное отклонение вдоль фрезерованного желобка (как в одну, так и в другую сторону). Подобное коробление вызвано наличием ориентации во внутреннем напряжённом состоянии детали, возникшем после механообработки и следом проводимой рихтовки, последствия которых не устраняются нагревом, а сочетаясь с закалочными деформациями, они и приводят к наблюдаемым отклонениям острия под определённым углом.

Процессы, протекающие при отпуске (рис. 3, 4), несколько снижают значения l для всех диаметров, оставляя их у малых диаметров вне допустимых пределов, а имеющееся преимущественное распределение по φ сохраняется.

Данные таблицы 2 демонстрируют, что в процессе механообработки происходит такое изменение напряжённого состояния детали, когда значительно падают эксплуатационные показатели изделия. Таким образом, если устранить коробление (и, следовательно, необходимость в правке), то можно повысить эксплуатационные свойства изделий [26]. Реализация бездеформационной закалки становится возможной благодаря своеобразной внутренней рихтовке (рис. 5 и 6) за счёт возникновения кристаллов мартенсита напряжения (под действием магнитного поля в интервале сверхпластичности) и ориентированному заневоливаю игл вдоль линий магнитного потока.

Статистические данные на рис. 6 свидетельствуют об измельчении мартенситной фазы (речной и двойниковой морфологии), ансамбля в целом (пакета) и кристалла в отдельности в случае закалки в магнитном поле. Дисперсность, соответственно, увеличивает удельную поверхность границы и субграницы — создаются дислокационные барьеры для пластической деформации. Пиковые напряжения спадают и более равномерно распределяются в ситуации, когда области скопления дислокаций фрагментируются и пакеты мартенсита более однородно распределяются. Таким образом, закалка в магнитном поле формирует структуру мартенсита с большим запасом реализуемых прочностных и пластических показателей, что обеспечивает повышенный комплекс свойств после ТОМП.

По результатам исследования влияния низкого отпуска (рис. 3, 4, 8) можно заключить, что он, снижая уровень закалочных напряжений, не приводит к кардинальному искоренению радиальных биений.

Результаты исследования предела выносливости (рис. 9) показали его повышение при обработке в магнитном поле, в сравнении с серийным режимом, предполагающим механическую обработку для устранения коробления.

Заключение. Установлено, что операции механической правки, применяемые для устранения коробления, создают картину напряжений, значительно снижающую эксплуатационные характеристики изделий (предел выносливости может падать до 370 МПа, остаточная деформация может достигать 0,40 мм).

Опытным путем получены свидетельства того, что упрочняющая технология ТОМП, основанная на закалке стали в магнитном поле, позволяет устранять радиальные биения изделий стержневой формы ($L/D > 10$). В процессе внутренней рихтовки, которая реализуется особой схемой обработки ТОМП, исключается необходимость обычной мехобработки, снижающей эксплуатационные характеристики изделия. Это достигается, с одной стороны, непосредственным вертикальным заневоливанием обрабатываемой иглы под действием вектора магнитного потока, а с другой стороны, за счёт влияния магнитного поля на закалочные процессы (повышение дисперсности мартенсита). По сравнению с серийным режимом, наблюдалось увеличение предела выносливости в среднем на ~ 82 МПа, а значения коробления (с двукратным запасом) не превышали технических требований (0,10 мм).

Список литературы / References

1. Пустовойт В.Н., Долгачев Ю.Н. Формирование эпюры остаточных напряжений после закалки в магнитном поле. *Безопасность техногенных и природных систем*. 2024;(4):54–61. <https://doi.org/10.23947/2541-9129-2024-8-4-54-61>
2. Pustovoi VN, Dolgachev YuV. Formation of Residual Stress Diagram after Quenching in a Magnetic Field. *Safety of Technogenic and Natural Systems*. 2024;(4):54–61. <https://doi.org/10.23947/2541-9129-2024-8-4-54-61>
3. Samuel A, Prabhu KN. Residual Stress and Distortion during Quench Hardening of Steels: A Review. *Journal of Materials Engineering and Performance*. 2022;31:5161–5188. <https://doi.org/10.1007/s11665-022-06667-x>
4. Schlegel J. Finishing. In book: *The World of Steel*. Wiesbaden: Springer; 2023. P. 357–368. https://doi.org/10.1007/978-3-658-39733-3_9
5. Rajan TV, Sharma CP, Sharma A. *Heat Treatment: Principles and Techniques*, 3rd ed. Delhi: PHI Learning Pvt. Ltd; 2023. 376 p. <https://books.google.ru/books?id=zuraEAAAQBAJ&hl=ru&lr> (дата обращения: 01.04.2026).
6. Coca-Gonzalez M, Jimenez-Martinez M. Warpage: Causes, Manufacturing Processes and Future Challenges: A Review. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part L: Journal of Materials: Design and Applications*. 2025;239(6):1201–1217. URL: <https://journals.sagepub.com/doi/full/10.1177/14644207241285399> (дата обращения: 01.04.2026)
7. Iskakova D, Kasenov A, Magellan D, Zoltan K. Analysis of Methods of Hardening and Restoration of Worn Parts. *Studia Universitatis Babeş-Bolyai Engineering*. 2024;69(1):137–148. <https://doi.org/10.24193/subbeng.2024.1.14>
8. Бабич В.Е., Багрец Д.А., Белоцерковский М.А., Вегера И.И., Гольцева М.В., Громыко Г.Ф. и др. *Актуальные проблемы прочности*. Монография. В 2-х томах. Том 2. Витебск: Витебский государственный технологический университет; 2018. 512 с.
9. Babich VE, Bagrets DA, Belotserkovsky MA, Vegera II, Goltseva MV, Gromyko GF, et al. *Topical Problems of Strength*. Monograph. In 2 vol. Vol 2. Vitebsk: Vitebsk State Technological University; 2018. 512 p. (In Russ.)
10. Андреев И.Г., Шакиров А.Р. Дефекты, возникающие при термической обработке стали. *Современные материалы, техника и технологии*. 2023;47(2):22–24.
11. Andreev IG, Shakirov AR. Obtaining a Finegrained Structure by Applying Annealing and Normalization. *Sovremennye materialy, tekhnika i tekhnologii*. 2023;47(2):22–24. (In Russ.)
12. Пустовойт В.Н., Долгачев Ю.В. *Магнитная гетерогенность аустенита и превращения в сталях*. Монография. Ростов-на-Дону: Донской государственный технический университет; 2021. 198 с.
13. Pustovoi VN, Dolgachev YuV. *Magnetic Heterogeneity of Austenite and Transformations in Steels*. Monograph. Rostov-on-Don: Don State Technical University; 2021. 198 p. (In Russ.)
14. Dolgachev YuV, Pustovoi VN, Vernigorov YuM. Stress Martensite Nucleation in a State of Premartensitic Lattice Instability. *Advanced Engineering Research (Rostov-on-Don)*. 2024;24(1):58–65. <https://doi.org/10.23947/2687-1653-2024-24-1-58-65>
15. Huda Z. Plasticity and Superplasticity – Theory and Applications. In book: *Mechanical Behavior of Materials. Mechanical Engineering*. Cham: Springer; 2022. P. 165–188. https://doi.org/10.1007/978-3-030-84927-6_9
16. Гвоздев А.Е. *Деформирование, структурообразование и разрушение быстрорежущих сталей в условиях сверхпластичности*. Монография. Тула: Тульский государственный университет; 2021. 487 с.
17. Gvozdev AE. *Deformation, Structuring and Destruction of High-Speed Steels under Superplasticity Conditions*. Monograph. Tula: Tula State University; 2021. 487 p. (In Russ.)
18. Бернштейн М.Л. *Термомеханическая обработка металлов и сплавов*. В 2 т. Москва: Metallurgiya; 1968. 574 с.
19. Bernstein ML. *Thermomechanical Treatment of Metals and Alloys*. In 2 vol. Moscow: Metallurgiya; 1968. 574 p. (In Russ.)
20. Guo Yuan, Zhenlei Li, Jian Kang. *New Generation TMCP Technology for Hot Strip*. Singapore: Springer; 2024. 482 p. <https://doi.org/10.1007/978-981-97-5257-7>

15. Pustovoyt VN, Dolgachev YuV. Distortion-Free Heat Treatment of Thin Rods in Magnetic Field. *Materials Performance and Characterization*. 2018;7(6):20170159. <https://doi.org/10.1520/MPC20170159>
16. Иванова В.С. *Разрушение металлов*. Москва: Металлургия; 1979. 168 с. <https://search.rsl.ru/ru/record/01007811077>
- Ivanova VS. *Destruction of Metals*. Moscow: Metallurgiya; 1979. 168 p. <https://search.rsl.ru/ru/record/01007811077> (In Russ.).
17. Roberts WL. *Cold Rolling of Steel*. New York: Routledge; 2017. 808 p. <https://doi.org/10.1201/9781315139661>
18. Харитонов В.А., Таранин И.В. *Холодная прокатка проволоки: история и направления развития*. Монография. Магнитогорск: Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова; 2018. 124 с.
- Kharitonov VA, Tarantin IV. *Cold Wire Rolling: History and Development Trends*. Monograph. Magnitogorsk: Nosov Magnitogorsk State Technical University; 2018. 124 p. (In Russ.).
19. Morsdorf L, Jeannin O, Barbier D, Mitsuhashi M, Raabe D, Tasan CC. Multiple Mechanisms of Lath Martensite Plasticity. *Acta Materialia*. 2016;121:202–214. <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2016.09.006>
20. Galindo-Nava EI, Rivera-Díaz-del-Castillo PEJ. A Model for the Microstructure Behaviour and Strength Evolution in Lath Martensite. *Acta Materialia*. 2015;98:81–93. <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2015.07.018>
21. Bhadeshia HKDH. *Theory of Transformations in Steels*. Boca Raton, FL: CRC Press; 2021. 604 p. <https://doi.org/10.1201/9781003056782>
22. Михайлов М.С., Рябов В.В. Исследование процесса карбидообразования в среднеуглеродистых высокопрочных сталях. *Новости материаловедения. Наука и техника*. 2016;1(19):1.
- Mikhailov MS, Riabov VV. The Study of Carbide Formation in Middle-Carbon High-Strength Steels. *Novosti materialovedeniya. Nauka i tekhnika*. 2016;19(1):1.
23. Sackl S, Clemens H, Primig S. Investigation of the Self Tempering Effect of Martensite by Means of Atom Probe Tomography. *Practical Metallography*. 2022;52(7):374–383. <https://www.degruyter.com/document/doi/10.3139/147.110343/html> (дата обращения: 01.04.2026).
24. Silveira ACF, Fechte-Heinen R, Epp J. Microstructure Evolution during Laser-Directed Energy Deposition of Tool Steel by in situ Synchrotron X-ray Diffraction. *Additive Manufacturing*. 2023;63:103408. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2023.103408>
25. Padmanabhan KA, Balasivanandha Prabu S, Mulyukov RR, Nazarov A, Imayev RM, Ghosh Chowdhury S. *Superplasticity. Common Basis for a Near-Ubiquitous Phenomenon*. Berlin, Heidelberg: Springer; 2018. 526 p. <https://link.springer.com/book/10.1007/978-3-642-31957-0>
26. Rybak AT, Teplyakova S., Olshevskaya AV, Prutskov AS. A Method for Monitoring the Reliability of Technical Systems by Identifying the Entropy of the Causes of their Failures. *Advanced Engineering Research (Rostov-on-Don)*. 2025;25(2):112–119. <https://doi.org/10.23947/2687-1653-2025-25-2-112-119>

Об авторах:

Виктор Николаевич Пустовойт, доктор технических наук, профессор кафедры «Материаловедение и технологии металлов» Донского государственного технического университета (344003, Российская Федерация, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), [SPIN-код](#), [ORCID](#), [ResearchGate](#), [ResearcherID](#), pustovoyt45@gmail.com

Юрий Вячеславович Долгачев, доктор технических наук, доцент, профессор кафедры «Материаловедение и технологии металлов» Донского государственного технического университета (344003, Российская Федерация, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), [SPIN-код](#), [ORCID](#), [ResearchGate](#), [ResearcherID](#), ydolgachev@donstu.ru

Заявленный вклад авторов:

В.Н. Пустовойт: научное руководство, разработка концепции, методологии, административное руководство исследовательским проектом, предоставление ресурсов, написание черновика рукописи.

Ю.В. Долгачев: проведение исследования, формальный анализ, валидация результатов, визуализация, написание рукописи — устранение замечаний, внесение исправлений.

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

About the Authors:

Viktor N. Pustovoyt, Dr.Sci. (Eng.), Professor of the Department of Materials Science and Technology of Metals, Don State Technical University (1, Gagarin Sq., Rostov-on-Don, 344003, Russian Federation), [SPIN-code](#), [ORCID](#), [ResearchGate](#), [ResearcherID](#), pustovoyt45@gmail.com

Yuri V. Dolgachev, Dr.Sci. (Eng.), Associate Professor of the Department of Materials Science and Technology of Metals, Don State Technical University (1, Gagarin Sq., Rostov-on-Don, 344003, Russian Federation), [SPIN-code](#), [ORCID](#), [ResearchGate](#), [ResearcherID](#), ydolgachev@donstu.ru

Claimed Contributorship:

VN Pustovoi: supervision, conceptualization, methodology, project administration, resources, writing – original draft preparation.

YuV Dolgachev: investigation, formal analysis, validation, visualization, writing – review & editing.

Conflict of Interest Statement: the authors declare no conflict of interest.

All authors have read and approved the final version of manuscript.

Поступила в редакцию / Received 02.03.2026

Поступила после рецензирования / Reviewed 30.03.2026

Принята к публикации / Accepted 08.04.2026

МАШИНОСТРОЕНИЕ И МАШИНОВЕДЕНИЕ

MACHINE BUILDING AND MACHINE SCIENCE



УДК 621.914.3

Оригинальное эмпирическое исследование

<https://doi.org/10.23947/2687-1653-2026-26-2-2662>

Экспериментальный анализ и подход на основе кривизны для оптимизации точности при 3-осевом фрезеровании с ЧПУ вогнутых параболических поверхностей произвольной формы

Нгок Туен Буй¹ , Нгуен Тхо Ван²  ¹ Ханойский университет науки и технологий, Ханой, Вьетнам² Хайфонский университет, Хайфон, Вьетнам✉ thonv@dhhp.edu.vn

EDN: NRNBID

Аннотация

Введение. Вогнутые параболические поверхности свободной формы играют ключевую роль в высокоэффективных оптических отражателях и прецизионных механических узлах, где жесткие требования к геометрической точности определяют функциональную эффективность изделий. Несмотря на широкое распространение таких поверхностей, обеспечение высокого качества их обработки на 3-осевых фрезерных станках с ЧПУ остается существенной технической проблемой. Данная сложность обусловлена комплексными нелинейными взаимодействиями между геометрией режущего инструмента, параметрами обработки и изменяющейся локальной кривизной поверхности. В то время как традиционные исследования обычно сосредоточены на глобальной оптимизации параметров, существует заметный научный пробел в понимании того, как локальные градиенты кривизны определяют распределение погрешностей в процессе съема материала. Настоящее исследование устраняет этот пробел, предлагая аналитическую основу, учитывающую кривизну и направленную на выявление фундаментальных факторов погрешностей обработки параболических геометрий.

Материалы и методы. Методология исследования сочетает теоретическое моделирование со строгой экспериментальной проверкой. На первом этапе на основе теории главных отклонений была разработана математическая модель, характеризующая геометрические отклонения, свойственные процессу 3-осевой фрезеровки. Данная аналитическая база обеспечила возможность отображения теоретических погрешностей относительно дифференциальной геометрии поверхности. Затем было проведено экспериментальное исследование с применением ортогонального плана Taguchi L_9 для систематической оценки влияния трех основных технологических факторов: диаметра инструмента, подачи и поперечного смещения. Были изготовлены образцы вогнутых параболических поверхностей, которые затем подверглись измерениям на высокоточном метрологическом оборудовании. Обработка полученных данных выполнялась методами дисперсионного анализа (ANOVA) и анализа отношения сигнал/шум (S/N) ratio, что позволило количественно оценить индивидуальный и интерактивный статистический вклад каждого из рассматриваемых параметров в суммарную погрешность обработки.

Результаты исследования. Полученные результаты показали, что диаметр инструмента и поперечный шаг являются доминирующими факторами, на долю которых приходится основная часть дисперсии точности обработки, в то время как влияние скорости подачи в пределах исследуемого диапазона оказалось статистически незначительным. Важно отметить, что погрешности обработки распределены не равномерно, а существенно коррелируют с локальной главной кривизной параболического профиля. Моделирование в MATLAB дополнительно подтвердило эти выводы, показав, что максимальное отклонение происходит в областях с высокой кривизной, где геометрия взаимодействия инструмента с поверхностью наиболее ограничена. Данные результаты обеспечивают количественное отображение того, как взаимодействие геометрии инструмента с параболической вогнутой поверхностью приводит к образованию предсказуемых закономерностей распределения погрешностей.

Обсуждение. Настоящее исследование предлагает новую интерпретацию погрешностей механической обработки сквозь призму дифференциальной геометрии поверхности, успешно преодолевая разрыв между теоретическим моделированием поверхности и практическим фрезерованием на станках с ЧПУ. Результаты показывают, что универсальная стратегия построения траектории инструмента («один размер для всех») является принципиально недостаточной

для вогнутых свободных поверхностей из-за присущих им локальных геометрических сложностей. Данная работа подтверждает, что применение адаптивной стратегии изменения поперечного шага, динамически подстраиваемого в зависимости от локальных значений кривизны, существенно повышает точность формообразования поверхности. Ключевая научная новизна состоит в предложенной интеграции компенсации, основанной на кривизне, непосредственно на этапе планирования траектории движения инструмента, что позволяет упреждающе минимизировать погрешности вместо того, чтобы исправлять их постфактум.

Заключение. В заключение следует отметить, что предлагаемый подход представляет собой надежное и масштабируемое решение для повышения точности изготовления сложных компонентов произвольной формы в реальных промышленных условиях. Внедрение данной методологии в высокоточные производственные процессы позволит потенциально сократить объем последующей обработки и снизить общие производственные издержки. Несмотря на то, что настоящее исследование сосредоточено на статической и геометрической точности, в будущем предполагается расширить данную модель за счет включения оценки динамических погрешностей обработки. Это расширение создаст более комплексную основу для оптимизации точности при многокоординатной фрезерной обработке сложных поверхностей на станках с ЧПУ.

Ключевые слова: поверхность произвольной формы с вогнутой параболической структурой, диаметр инструмента, скорость подачи, поперечный шаг, кривизна поверхности, геометрическое отклонение, метод Тагучи

Благодарности. Авторы выражают искреннюю признательность Техническому практическому центру за предоставление образцов для испытаний и оборудования, использованного в экспериментальной работе. Авторы также благодарят редакционную коллегию журнала и анонимных рецензентов за их глубокие профессиональные заключения и ценные замечания, которые внесли существенный вклад в доработку и повышение качества настоящей статьи.

Для цитирования. Нгок Туен Буй, Нгуен Тхо Ван. Экспериментальный анализ и подход на основе кривизны для оптимизации точности при 3-осевом фрезеровании с ЧПУ вогнутых параболических поверхностей произвольной формы. *Advanced Engineering Research (Rostov-on-Don)*. 2026;26(2):2662. <https://doi.org/10.23947/2687-1653-2026-26-2-2662>

Original Empirical Research

Experimental and Curvature-Based Analysis for Accuracy Optimization in 3-Axis CNC Milling of Concave Parabolic Freeform Surfaces

Ngoc Tuyen Bui¹ , Nguyen Tho Van²  

¹ Hanoi University of Science and Technology, Hanoi, Vietnam

² Haiphong University, Haiphong, Vietnam

 thonv@dhhp.edu.vn

Abstract

Introduction. Concave parabolic freeform surfaces are integral to high-performance optical reflectors and precision mechanical components, where stringent geometric accuracy is paramount to functional efficiency. Despite their widespread application, achieving high surface fidelity in 3-axis CNC milling remains a significant technical challenge. This difficulty arises from the intricate, non-linear interactions between cutting tool geometry, machining parameters, and the varying local curvature of the surface. While conventional research often focuses on global parameter optimization, there exists a notable scientific gap in understanding how localized curvature gradients dictate error distribution during the material removal process. This study addresses this gap by establishing a curvature-aware analytical framework aimed at identifying the fundamental drivers of machining inaccuracies in parabolic geometries.

Materials and Methods. The research methodology integrates theoretical modeling with rigorous experimental validation. Initially, a mathematical model based on principal deviation theory was formulated to characterize the geometric deviations inherent in the 3-axis milling process. This analytical foundation allowed for the mapping of theoretical errors against surface differential geometry. Subsequently, an experimental investigation was executed using a Taguchi L_9 orthogonal array design to systematically evaluate the influence of three primary machining factors: tool diameter, feed rate, and step-over. Concave parabolic samples were machined and measured using high-precision metrology equipment. The resulting data were processed via Analysis of Variance (ANOVA) and Signal-to-Noise (S/N) ratio analysis to quantify the individual and interactive statistical contributions of each parameter to the total machining error.

Results. The findings demonstrate that tool diameter and step-over are the predominant factors, accounting for the majority of the variance in machining accuracy, whereas the influence of feed rate is found to be statistically marginal within the tested range. Crucially, the results have revealed that machining errors are not uniformly distributed but are highly correlated with the local principal curvatures of the parabolic profile. MATLAB simulations further corroborated these findings, showing that the maximum deviation occurs in regions of high curvature where the tool-surface engagement geometry is most constrained. These specific results provide a quantitative map of how tool geometry interacts with parabolic concavity to produce predictable error patterns.

Discussion. This research provides a novel interpretation of machining errors through the lens of surface differential geometry, successfully bridging the gap between theoretical surface modeling and practical CNC manufacturing. The findings demonstrate that a “one-size-fits-all” toolpath strategy is inherently insufficient for concave freeform geometries due to localized geometric complexities. Instead, this study validates that the implementation of an adaptive step-over strategy, dynamically adjusted based on local curvature values, significantly enhances surface forming accuracy. The core scientific novelty lies in the proposed integration of curvature-based compensation directly into the toolpath planning phase, allowing for proactive error mitigation rather than reactive adjustments.

Conclusion. In conclusion, the proposed approach offers a robust and scalable solution for improving the precision of complex freeform components in real-world industrial environments. By adopting this methodology, high-precision manufacturing processes can potentially reduce post-processing requirements and overall production costs. While this study focuses on static and geometric accuracy, future research will extend this model to incorporate the assessment of dynamic processing errors. This expansion will provide a more comprehensive framework for accuracy optimization in multi-axis CNC machining of complex surface.

Keywords: freeform surface with concave parabolic structure, tool diameter, feed rate, step-over, surface curvature, geometric deviation, Taguchi method

Acknowledgments. The authors would like to appreciate the Technical Practice Center for providing the test samples and equipment used in the experimental process. In addition, we would like to thank the Editorial Board of the Journal and the anonymous reviewers for their insightful professional evaluations and valuable recommendations, which significantly contributed to the improvement and enhancement of the quality of this article.

For Citation. Ngoc Tuyen Bui, Nguyen Tho Van. Experimental and Curvature-Based Analysis for Accuracy Optimization in 3-Axis CNC Milling of Concave Parabolic Freeform Surfaces. *Advanced Engineering Research (Rostov-on-Don)*. 2026;26(2):2262. <https://doi.org/10.23947/2687-1653-2026-26-2-2662>

Введение. Благодаря своим превосходным функциональным и эстетическим характеристикам поверхности произвольной формы все чаще используются в передовых инженерных решениях, таких как прецизионные пресс-формы, оптические компоненты и аэродинамические конструкции. Среди множества разнообразных локальных геометрических форм вогнутые параболические структуры широко применяются в таких компонентах, как параболические отражатели и антенные устройства, где геометрическая точность напрямую определяет функциональную эффективность. В частности, обработка таких поверхностей с помощью 3-осевого фрезерования на станках с ЧПУ остается сложной задачей из-за комплексного взаимодействия между геометрией инструмента, кривизной поверхности и стратегией траектории движения инструмента.

При фрезеровании концевыми шаровыми фрезами погрешности формообразования поверхности в значительной степени определяются такими геометрическими факторами, как радиус инструмента, подача и поперечное смещение, а также локальной кривизной обрабатываемой поверхности. В предыдущих работах было подробно исследовано влияние параметров обработки на качество поверхностей свободной формы. В последнее время существенный вклад в эту область внесла российская школа металлообработки, в рамках которой проводились как экспериментальная оценка, так и прогнозное моделирование геометрической точности при фрезеровании деталей сложной конфигурации. В [1] разработаны экспериментальная методика и математическая модель для управления показателями геометрической точности отливок штампов при фрезеровании шаровыми концевыми фрезами. Полученная модель была использована для коррекции траектории инструмента. В [2] авторы установили эмпирические зависимости между стойкостью сферических концевых фрез, геометрической точностью и шероховатостью поверхности, которые легли в основу определения как периодичности замены инструмента, так и критериев оценки качества поверхности. Далее авторы [3] исследовали влияние углов ориентации инструмента на шероховатость поверхности при обработке деталей со сложным профилем, показав ключевую роль геометрии контакта инструмента с обрабатываемой поверхностью в достижении итогового качества.

В работе [4] было оценено влияние различных стратегий построения траектории инструмента, а в [5] проанализировано влияние скорости подачи. Роль поперечного шага в формировании геометрических отклонений была определена в исследовании [6]. В ряде других работ использовались подходы планирования эксперимента, например метод Тагучи в сочетании с дисперсионным анализом (ANOVA), для определения оптимальных режимов обработки, обеспечивающих минимизацию погрешностей поверхности [7]. Результаты этих исследований показали, что стратегия обработки часто является главным фактором, влияющим на точность фрезерования [8]. Кроме того, статистический анализ подтвердил существенное влияние поперечного шага на качество формообразования поверхности [9]. Некоторые авторы сосредоточили свои усилия на сравнении стратегий построения траектории инструмента в различных САМ-системах [10] или на разработке методов определения высоты гребешков непосредственно по управляющим программам для станков с ЧПУ [11]. Также были предложены способы уменьшения колебаний эффективного диаметра инструмента, направленные на обеспечение стабильной точности обработки [12].

Тем не менее, большинство имеющихся работ посвящены либо поверхностям свободной формы общего вида, либо отдельным типам геометрии, например рабочим колесам [13]. Другие исследования ориентированы на такие специфические профили, как седловые поверхности [14], или же на оптимизацию геометрических характеристик специализированных циклоидальных профилей [15]. Между тем, вопросам обработки вогнутых параболических структур уделяется недостаточно внимания. Что еще более важно, взаимосвязь между режимами обработки и точностью поверхности зачастую исследуется исключительно экспериментальными методами, без явного учета того, как кривизна поверхности влияет на возникновение геометрических отклонений. Вследствие этого фундаментальные механизмы, объясняющие доминирующее влияние тех или иных параметров на точность обработки, остаются в значительной степени невыясненными.

Для преодоления указанных ограничений данное исследование посвящено обработке поверхностей свободной формы, содержащих вогнутые параболические структуры, которые характеризуются первой главной кривизной, равной нулю, и второй главной кривизной, имеющей переменное отрицательное значение. На базе теории главных отклонений и геометрии поверхности [16] была разработана экспериментальная модель, позволяющая изучить влияние таких ключевых параметров обработки, как диаметр инструмента, скорость подачи и поперечный шаг, на точность формообразования поверхности при 3-осевом фрезеровании на станках с ЧПУ. Применяется систематическое планирование эксперимента по методу ортогональных массивов Тагучи, а полученные результаты обрабатываются методом дисперсионного анализа (ANOVA) для количественной оценки вклада каждого из исследуемых параметров [17].

Цель настоящей работы — оценить влияние кривизны поверхности, радиуса инструмента, поперечного шага и подачи на геометрическую погрешность при обработке вогнутой параболической структуры на 3-осевом фрезерном станке с ЧПУ. С помощью теоретических моделей погрешностей и имитационного моделирования в MATLAB проводится оценка распределения погрешности от подачи, погрешности от поперечного шага и суммарной погрешности по поверхности при формировании параллельных траекторий движения инструмента в двух главных направлениях кривизны. На основании этого определяется рациональное направление траектории обработки и предлагается адаптивный метод построения траектории, базирующийся на разработанной теоретической модели. Для оценки степени влияния радиуса инструмента, поперечного шага и подачи на точность формообразования используются экспериментальные модели. В дополнение к традиционному экспериментальному анализу в данной работе особое внимание уделяется геометрической интерпретации погрешностей механической обработки путем установления их связи с факторами, определяемыми кривизной поверхности. Это позволяет более глубоко понять характер взаимодействия между геометрией режущего инструмента и свойствами обрабатываемой поверхности. Полученные результаты способствуют углубленному пониманию чувствительности технологических параметров при фрезеровании вогнутых параболических поверхностей и создают основу для совершенствования планирования траекторий инструмента и повышения эффективности обработки в практических условиях.

Материалы и методы. Исследуемая поверхность генерируется путем перемещения параболической кривой вдоль прямой линии, в результате чего получается параболическая цилиндрическая поверхность. Параметрическое представление поверхности определяется следующим образом:

$$\mathbf{P}(u, v) = (x(u), y(v), z(u)) = (60u - 30, 70v, |240u^2 - 240u + 60|). \quad (1)$$

$$0 \leq u, v \leq 1.$$

Такое построение означает, что поверхность обладает кривизной лишь в одном параметрическом направлении — u , оставаясь при этом геометрически линейной вдоль направления v .

Пример экспериментальной модели с вогнутой параболической поверхностью свободной формы $\mathbf{P}(u, v)$ был создан в системе NX12, как показано на рис. 1.

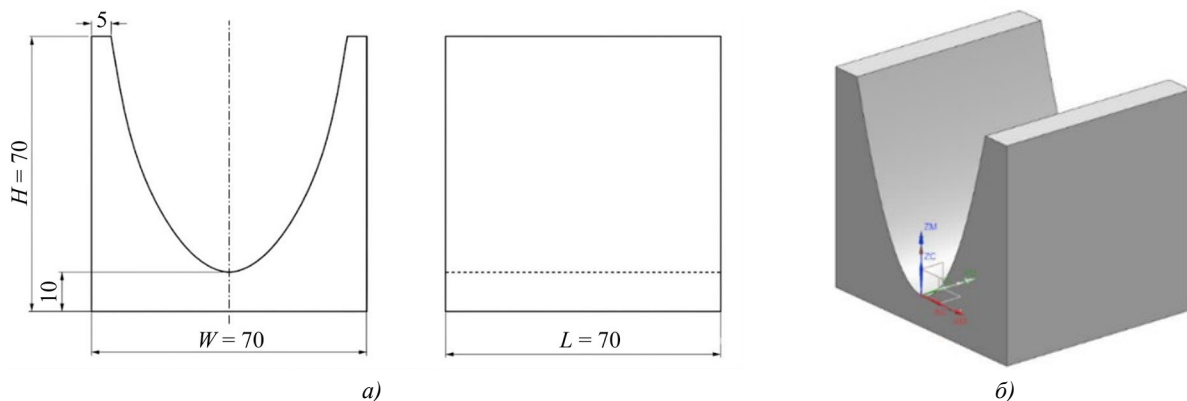


Рис. 1. Чертеж экспериментального образца *a* — двухмерный чертеж; *б* — трехмерная модель

Частные производные первого порядка выражаются следующим образом:

$$\mathbf{P}_u = (60, |0, |480u - 240), \mathbf{P}_v = (0, |70, |0). \quad (2)$$

Производные второго порядка следующие:

$$\mathbf{P}_{uu} = (0, |0, |480), \mathbf{P}_{vv} = (0, |0, |0).$$

Вдоль направления v (направления генератора) первая главная кривизна:

$$k_1 = 0.$$

Вдоль направления u (направление кривой профиля), вторая главная кривизна:

$$k_2 = \frac{z''(u)}{[1 + (z'(u))^2]^{3/2}} = \frac{480}{[1 + (480u - 240)^2]^{3/2}}. \quad (3)$$

Знак кривизны зависит от ориентации поверхности; для вогнутых конфигураций он считается отрицательным. Важно отметить, что k_2 непрерывно изменяется вдоль параметра u , отражая неравномерное распределение кривизны параболического профиля.

Гауссова кривизна задается формулой:

$$K = k_1 \cdot k_2 = 0. \quad (3)$$

Это подтверждает, что поверхность является развертываемой поверхностью, характеризующейся нулевой гауссовой кривизной.

Средняя кривизна равна:

$$H = \frac{1}{2}(k_1 + k_2) = \frac{k_2}{2}, \quad (4)$$

которая изменяется вдоль поверхности из-за зависимости k_2 от u .

Характеристики кривизны поверхности существенно влияют на геометрическую точность при фрезеровании на станках с ЧПУ, что имеет критически важное значение для общей точности обработки.

Поскольку $k_1 = 0$, отклонения, вызванные кривизной, вдоль направления траектории инструмента отсутствуют, когда оно совпадает с направлением генератора.

Изменение кривизны $k_2(u)$ приводит к неравномерным условиям контакта инструмента с поверхностью, что существенно влияет на геометрические отклонения.

Области с большей кривизной (меньшим радиусом) более чувствительны к диаметру инструмента и поперечному шагу, что приводит к большей высоте гребешка и погрешности формы.

Таким образом, геометрическое отклонение при фрезеровании шаровым фрезером можно интерпретировать как явление, зависящее от кривизны, где доминирующую роль играет вторая главная кривизна.

Оптимизация точности обработки обеспечивается за счет всестороннего анализа стратегий траектории движения инструмента и моделирования на основе кривизны. Для обработки вогнутой параболической цилиндрической поверхности исследованы две репрезентативные стратегии траектории движения инструмента. В случае А направление подачи совпадает с направлением нулевой кривизны ($k_1 = 0$), а поперечное смещение осуществляется вдоль параболического профиля. В случае В подача осуществляется вдоль параболического профиля, а поперечный шаг выполняется в направлении нулевой кривизны.

При обработке поверхностей произвольной формы концевой шаровой фрезой величина геометрических отклонений в значительной степени определяется локальной кривизной обрабатываемой поверхности. Для рассматриваемой параболической цилиндрической поверхности характерна анизотропная кривизна, при этом одна главная кривизна равна нулю, а другая изменяется вдоль поверхности.

Пусть вторая главная кривизна равна:

$$k(u) = k_2(u), R(u) = \frac{1}{|k(u)|}, \quad (5)$$

где $R(u)$ — локальный радиус кривизны.

Суммарное геометрическое отклонение при обработке концевой шаровой фрезой можно аппроксимировать как сумму двух составляющих:

$$h_{\Sigma}(u) = h_f + h_s,$$

где h_f, h_s — отклонение в направлении подачи и отклонение от поперечного шага (высота гребешка), соответственно.

Геометрические отклонения можно аппроксимировать с помощью разложения профиля поверхности в ряд Тейлора второго порядка [18]. Данный подход приводит к классическому соотношению $h \approx s^2/(8R)$, которое широко описано в теории производственной технологии [19].

Эффективный радиус кривизны $R_{eff}(u)$ определяется путем совместного учета кривизны обрабатываемой поверхности и геометрии шаровой концевой фрезы. На основе принципа суперпозиции кривизны эффективный радиус может быть записан как

$$\frac{1}{R_{eff}(u)} = \frac{1}{R(u)} + \frac{1}{R_T}, \quad (6)$$

что приводит к:

$$R_{eff}(u) = \frac{R(u)R_T}{R(u) + R_T}. \quad (7)$$

Здесь $R(u)$ и R_T — радиусы кривизны обработанной поверхности и шарообразного наконечника инструмента соответственно.

Вследствие анизотропных характеристик кривизны поверхности геометрическое отклонение демонстрирует различное поведение в направлениях скорости подачи и поперечного шага.

Для случая A погрешность по подаче h_f^A остается неизменной вдоль всей траектории инструмента, так как кривизна в этом направлении нулевая, и эффективный радиус оказывается равным радиусу самой фрезы. Отклонение по направлению подачи:

$$h_f^A \approx \frac{f_z^2}{8R_{eff,f}^A}, \quad (8)$$

где эффективный радиус равен:

$$R_{eff,f}^A = R_T.$$

Основной геометрической погрешностью при чистовой обработке является отклонение от поперечного шага (высота гребешка) $h_s^A(u)$, вызванное поперечным шагом S :

$$h_s^A(u) = \frac{S^2}{8R_{eff,s}^A(u)}, \quad (9)$$

где эффективный радиус равен:

$$R_{eff,s}^A(u) = \frac{R(u)R_T}{R(u) + R_T}.$$

Суммарное отклонение, обусловленное кривизной h_A , в случае A равно:

$$h_A = \frac{f_z^2}{8R_T} + \frac{S^2}{8R_{eff,s}^A(u)}. \quad (10)$$

В случае B наблюдается обратная картина. Погрешность от поперечного шага остается постоянной, тогда как погрешность по направлению подачи существенно зависит от локальной кривизны. Вблизи вершины параболы, где кривизна максимальна, эффективный радиус уменьшается, что вызывает резкий рост погрешности в направлении подачи. Это приводит к неравномерному распределению погрешности с ярко выраженными пиками на участках наибольшей кривизны.

Отклонение направления подачи $h_f^B(u)$ зависит от подачи на зуб f_z , радиуса инструмента R_T и радиуса кривизны $R(u)$:

$$h_f^B(u) \approx \frac{f_z^2}{8R_{eff,f}^B(u)}, \quad (11)$$

где эффективный радиус равен:

$$R_{eff,f}^B(u) = \frac{R(u)R_T}{R(u) + R_T}.$$

Отклонение поперечного шага h_s^B , вызванное поперечным шагом S , в данном случае аппроксимируется как:

$$h_s^B \approx \frac{S^2}{8R_{eff,s}^B}, \quad (12)$$

где эффективный радиус равен:

$$R_{eff,s}^B = R_T.$$

Суммарное отклонение, обусловленное кривизной в случае B составляет:

$$h_B = \frac{f_z^2}{8R_{eff,f}^B(u)} + \frac{S^2}{8R_T}. \quad (13)$$

В рамках модели оптимизации точности обработки на основе кривизны для выполнения требований к точности суммарная ошибка $h_{\Sigma}(u)$ должна удовлетворять следующему ограничению:

$$h_{\Sigma}(u) \leq [h], \quad (14)$$

где $[h]$ — максимально допустимое геометрическое отклонение.

Подставляя отклонение h_A в это неравенство, получаем:

$$\frac{f_z^2}{8R_T} + \frac{S(u)^2}{8R_{eff,s}^A(u)} \leq [h]. \quad (15)$$

Решая уравнение относительно $S(u)$, получаем адаптивный по кривизне поперечный шаг в виде:

$$S(u) = \sqrt{8R_{eff,s}^A(u) \left([h] \frac{f_z^2}{8R_T} \right)}. \quad (16)$$

Для проведения экспериментальных исследований была разработана экспериментальная установка, позволяющая верифицировать предложенную модель.

Станок: фрезерный станок с ЧПУ DX-6080 производства WANTAI (Тайвань) со следующими основными техническими характеристиками: размер стола 600 x 800 мм; мощность главного шпиндельного двигателя 5,5 кВт, частота вращения шпинделя 600–18000 об/мин; максимальная скорость подачи 6000 мм/мин; повторяемая точность позиционирования 0,005 мм.

Режущий инструмент: из приведенной выше формулы определения кривизны k_2 наименьший радиус кривизны поверхности определяется как $R_{pmin} = 7,5$ мм. Поэтому, чтобы избежать подрезания, в данном исследовании были выбраны концевые сферические фрезы Ф6, Ф10, Ф14 от компании G.T. Cutting Tools (Тайвань) с числом зубьев $Z = 2$.

Заготовка: Д x Ш x В = 70 x 70 x 70 (мм), алюминиевый сплав А6061

Программное обеспечение САМ: NX12

Оборудование для измерений: 3D-сканер SIMSCAN от компании SCANTECH (HANGZHOU) CO., LTD с точностью до 0,020 мм, скоростью сканирования до 2020000 измерений/сек, разрешением до 0,025 мм, областью сканирования до 410 мм x 400 мм.

План эксперимента: заготовки подвергаются черновой и получистовой обработке для получения цилиндрической поверхности с припуском на чистовую обработку 0,1 мм.

Экспериментальный процесс чистовой обработки проводился с использованием стратегии параллельной зигзагообразной резки (случай А) в соответствии с экспериментальным планом, разработанным на основе ортогонального массива Тагучи $OA_9(3^3)$ с тремя факторами: поперечный шаг (S), скорость подачи (F) и диаметр инструмента (D). Факторы и уровни эксперимента представлены в таблице 1.

Таблица 1

Факторы и уровни

Факторы	Уровни		
	1	2	3
Поперечный шаг S (мм)	0,1	0,4	0,7
Скорость подачи F (мм/мин)/ f_z (мм/зуб)	100/(0,025)	500/(0,125)	900/(0,225)
Диаметр инструмента D (мм)	6	10	14

Остальные технологические условия остаются неизменными для всех 9 образцов: скорость вращения шпинделя $n = 2000$ об/мин, глубина резания 0,1 мм, промывка смазочно-охлаждающей жидкостью. Результатами данного плана эксперимента являются показатели точности механической обработки, которая оценивается через геометрическое отклонение поверхности изготовленного образца от поверхности проектируемого образца.

Готовые обработанные образцы (рис. 4) были оцифрованы с помощью портативного 3D-сканера SIMSCAN. Используя эти 9 файлов данных облака точек, последовательно совместили их с поверхностью проектной CAD-модели для определения геометрических погрешностей образцов с помощью инструмента Geomagic Quality 2003. Geomagic Quality выполняет итеративную жесткую регистрацию между измеренным облаком точек и номинальной поверхностью CAD-модели, минимизируя расстояние по методу наименьших квадратов между соответствующими геометрическими объектами в соответствии с принципами ICP. Критерием оценки геометрических погрешностей является среднее отклонение, определяемое по формуле: среднее отклонение = (максимальное отклонение – минимальное отклонение)/2.

Результаты и обсуждение. На основе проведенного анализа была написана программа моделирования погрешностей обработки в MATLAB с входными параметрами: радиус инструмента $R_T = 7$ мм, скорость подачи $f_z = 0,2$ мм/зуб, поперечный шаг $S = 0,1$ мм. Результаты программы для погрешностей обработки в двух случаях А и В показаны на рис. 2. Сравнение суммарной погрешности обработки показывает, что обе стратегии приводят к погрешностям, изменяющимся вдоль поверхности. Однако случай А неизменно дает меньшие значения погрешностей, чем случай В, во всем диапазоне параметров. Наиболее существенно то, что в случае А распределение погрешностей отличается большей гладкостью и стабильностью, тогда как в случае В наблюдается высокая чувствительность к вариациям кривизны. Данное различие имеет критическое значение с точки зрения производства, поскольку значительные колебания погрешности в направлении подачи напрямую связаны с волнистостью поверхности и отклонением формы.

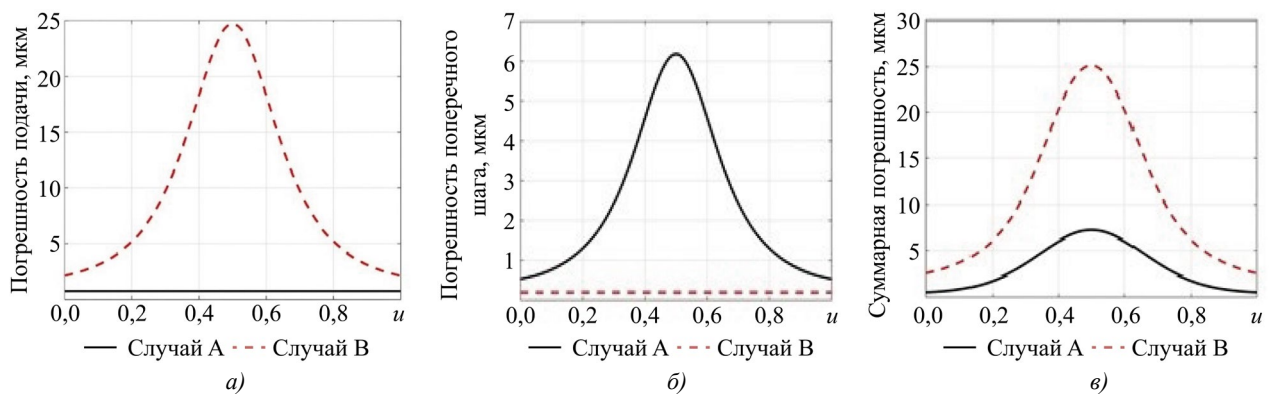


Рис. 2. Моделирование погрешностей для двух случаев:
 а — погрешность подачи; б — погрешность поперечного шага; в — суммарная погрешность

Результаты показывают, что погрешность направления подачи играет доминирующую роль в определении общей точности формы. Хотя суммарная величина погрешности может казаться сопоставимой при определенных комбинациях параметров, перераспределение компонентов погрешности существенно влияет на конечное качество поверхности. Выравнивание направления подачи с направлением минимальной кривизны в случае А эффективно отделяет наиболее критический компонент погрешности от изменений кривизны, тем самым повышая стабильность и точность обработки. Следовательно, стратегия траектории инструмента в случае А лучше, чем стратегия траектории инструмента в случае В.

С практической точки зрения, это открытие подтверждает стратегию, обычно используемую в передовых системах САМ, таких как Siemens NX и PowerMill, где траектории движения инструмента предпочтительно ориентированы вдоль направлений с минимальной кривизной. Следовательно, для обработки параболических цилиндрических поверхностей оптимальной стратегией является выравнивание направления подачи с направлением нулевой кривизны и управление поперечным шагом в соответствии с локальной кривизной.

На рис. 3 показан результат выполнения программы с входными данными $R_T = 7$ мм, $f_z = 0.02$ мм/зуб, допустимая погрешность $[h] = 0,02$ мм. При поперечном шаге, адаптирующемся в соответствии с кривизной поверхности, как показано на диаграмме, геометрическая погрешность поверхности останется неизменной и составит 0,02 мм. В настоящее время коммерческие САМ-системы, такие как Siemens NX и PowerMill, также поддерживают адаптивный поперечный шаг, однако он реализован косвенно и эвристически, в отличие от явной аналитической формулировки, предложенной в данной работе.

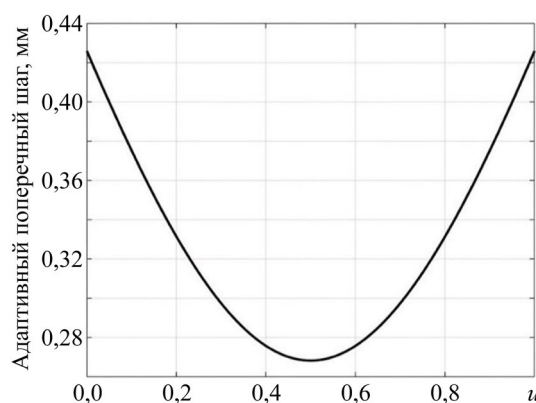


Рис. 3. Адаптивное моделирование с поперечным шагом для случая А

В отношении экспериментальных результатов и их обсуждения: обработанные образцы представлены на рис. 4, измеренные геометрические погрешности для образца 2 показаны на рис. 5, а полные данные о погрешностях суммированы в таблице 2.



Рис. 4. 9 экспериментальных образцов

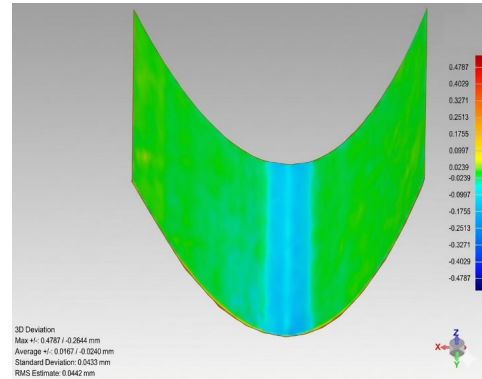


Рис. 5. Геометрическая погрешность заготовки 2

При анализе и оценке точности механической обработки производительность оценивается на основе конкретных критериев погрешности: чем меньше погрешность обработки, тем выше точность. Руководствуясь принципом выбора минимально возможного значения выходного сигнала (чем меньше, тем лучше), определяется отношение сигнал/шум (S/N) для каждого эксперимента (таблица 2).

Таблица 2

Экспериментальные результаты, полученные на основе ортогонального массива Тагучи OA9(33)

№	S (мм)	F (мм/мин)	D	Геометрическое отклонение (μm)			(S/N) _Δ
				Верхнее	Нижнее	Среднее Δ	
1	0,1	100	6	18,9	35,3	27,1	-14,3297
2	0,1	500	10	16,7	24	20,35	-13,0856
3	0,1	900	14	20,4	18	19,2	-12,833
4	0,4	100	10	16,8	28,7	22,75	-13,5698
5	0,4	500	14	16,6	22,1	19,35	-12,8668
6	0,4	900	6	18,2	39,2	28,7	-14,5788
7	0,7	100	14	15,5	34	24,75	-13,9358
8	0,7	500	6	22,6	45,8	34,2	-15,3403
9	0,7	900	10	25,7	38,2	31,95	-15,0447

Среднее отношение сигнал/шум для каждого фактора на уровнях 1, 2 и 3 можно рассчитать, усредняя отношения сигнал/шум соответствующих экспериментов. Влияние каждого фактора на геометрическую погрешность обработанной поверхности определяется с помощью Minitab, как показано на рисунке 6. Высокое значение отношения сигнал/шум указывает на то, что обработанная поверхность имеет малые геометрические погрешности.

Результаты дисперсионного анализа (ANOVA) для отношения сигнал/шум (S/N)_Δ представлены ниже в таблице 3. Коэффициенты детерминации составляют R-Sq = 98,92 % и R-Sq(adj) = 95,68 %, что свидетельствует о высоком качестве модели. Для фактора S (поперечный шаг) число степеней свободы (DF) равно 2, последовательная сумма квадратов (Seq SS) и скорректированная сумма квадратов (Adj SS) составляют 12,4878, скорректированный средний квадрат (Adj MS) — 6,2439, значение F-критерия (критерий Фишера) — 41,36, а уровень значимости P = 0,024.

Таблица 3

Результаты дисперсионного анализа (ANOVA) для отношения (S/N)_Δ

Сводка по модели R-Sq = 98,92%, R-Sq(adj) = 95,68 %

Источник	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
S	2	12,4878	12,4878	6,2439	41,36	0,024
F	2	0,9044	0,9044	0,4522	2,99	0,250
D	2	14,2398	14,2398	7,1199	47,16	0,021
Остаточная погрешность	2	0,3020	0,3020	0,1510		
Суммарная	8	27,9339				

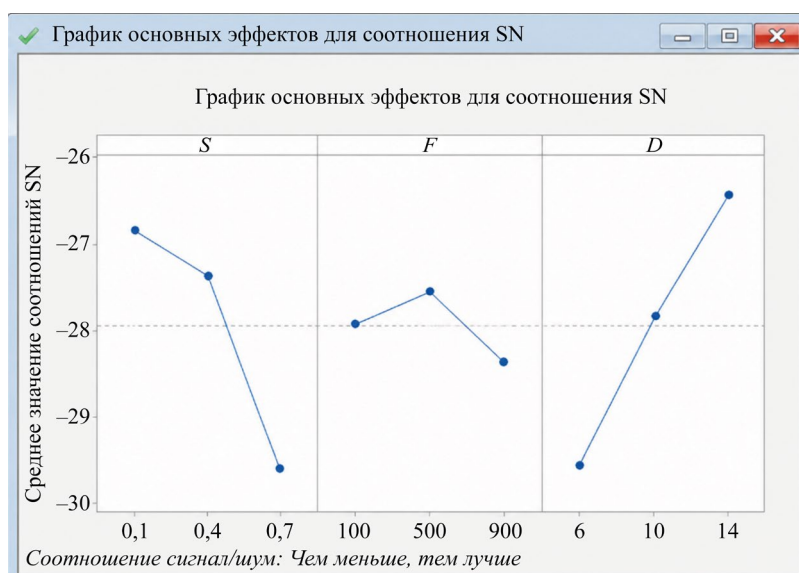


Рис. 6. График основных эффектов для отношений сигнал/шум (S/N)_Δ

На основе данных в этой таблице можно также определить влияние каждого фактора на точность обработки. Наибольшее влияние оказывает диаметр инструмента (*D*) (51%), за ним следует влияние поперечного шага (44,7%). Наименьшее влияние оказывает скорость подачи (3%) (таблица 4). Data means

Таблица 4

Влияние факторов на точность обработки

№	Фактор	Вклад, %
1	Поперечный шаг (<i>S</i>)	44,7
2	Скорость подачи (<i>F</i>)	3
3	Диаметр инструмента (<i>D</i>)	51
4	Погрешности	1,3

Отсюда видно, что соответствие формообразующего инструмента и обрабатываемой поверхности оказывает существенное влияние на точность обработки. При максимально возможном значении отношения сигнал/шум можно выбрать оптимальный набор параметров $S_1F_2D_3$. Оптимальные параметры для достижения наилучшей геометрической точности обработанной поверхности: поперечный шаг 0,1 мм, скорость подачи 500 мм/мин, диаметр инструмента 14 мм.

Прогнозируемое среднее отклонение в этом случае составит:

$$\Delta_{min} = \bar{\Delta}(S_1) + \bar{\Delta}(F_2) + \bar{\Delta}(D_3) - 2 \frac{\sum \Delta_i}{9} = 22,22 + 24,63 + 21,1 - 2 \cdot 228,35 / 9 \approx 17,2 \text{ (мкм)}. \quad (17)$$

Заключение. В данном исследовании изучалось влияние параметров обработки на точность формирования вогнутых параболических поверхностей произвольной формы при 3-осевом фрезеровании на станках с ЧПУ. В отличие от традиционных экспериментальных подходов, была предложена аналитическая модель, основанная на кривизне, для интерпретации погрешностей обработки с геометрической точки зрения.

Результаты подтверждают, что рассматриваемая поверхность обладает анизотропными характеристиками кривизны, где одна главная кривизна равна нулю, а другая непрерывно изменяется вдоль поверхности. Это геометрическое свойство приводит к неравномерным условиям взаимодействия инструмента и поверхности, что существенно влияет на точность обработки. Экспериментальный анализ, основанный на методе Тагучи и дисперсионном анализе, показывает, что поперечный шаг и диаметр инструмента являются доминирующими факторами, влияющими на геометрическое отклонение, в то время как скорость подачи оказывает сравнительно меньшее влияние.

С целью теоретического обоснования данных наблюдений была разработана оптимизационная модель на основе кривизны. Модель связывает погрешности обработки с локальной кривизной посредством формулировки эффективного радиуса, демонстрируя, что и отклонение направления подачи, и высота гребешка обратно пропорциональны радиусу кривизны. На основе этой зависимости была предложена стратегия адаптивного поперечного шага, учитывающего кривизну поверхности, что позволяет обеспечить постоянство допустимой погрешности по всей обрабатываемой поверхности.

Сравнение стратегий обработки с постоянным и адаптивным шагом показывает, что адаптивный подход значительно снижает разброс погрешностей и повышает общую точность обработки поверхности. Этот результат подтверждает важность учета геометрических особенностей поверхности при выборе режимов обработки вместо использования исключительно эмпирических методов оптимизации.

Хотя стандартные контроллеры ЧПУ не поддерживают прямую реализацию непрерывного адаптивного поперечного шага с учетом кривизны, предложенная модель обеспечивает теоретическую основу для генерации траектории движения инструмента с постоянной высотой гребешка, доступной в современных САМ-системах. Таким образом, результаты данного исследования имеют практическое значение для повышения эффективности и точности обработки в промышленных приложениях.

В дальнейшем планируется расширить предложенный подход на более сложные поверхности свободной формы, характеризующиеся ненулевой гауссовой кривизной, а также осуществить интеграцию оптимизации на основе кривизны в системы автоматического построения траекторий инструмента и интеллектуальные обрабатывающие системы.

Список литературы / References

1. Safarov DT, Glinina GF, Kasyanov SV. Improving the Accuracy of Die Impression Milling for Large-Size Forgings of Heavy-Duty Vehicle Parts. *Russian Engineering Research*. 2024;44(8):1128–1136. <https://doi.org/10.3103/S1068798X24701880>
2. Safarov DT, Glinina GF, Kondrashov AG. Geometric Accuracy of Die Engraving: Experimental Data and Modeling. *Russian Engineering Research*. 2023;43(11):1400–1407. <https://doi.org/10.3103/S1068798X23110266>
3. Гимадеев М.Р., Никитенко А.В., Беркун В.О. Влияние углов ориентации сфероцилиндрического инструмента на шероховатость при обработке сложнопрофильных поверхностей. *Advanced Engineering Research (Rostov-on-Don)*. 2023;23(3):231–240. <https://doi.org/10.23947/2687-1653-2023-23-3-231-240>
4. Gimadeev MR, Nikitenko AV, Berkun VO. Influence of the Sphero-Cylindrical Tool Orientation Angles on Roughness under Processing Complex-Profile Surfaces. *Advanced Engineering Research (Rostov-on-Don)*. 2023;23(3):231–240. <https://doi.org/10.23947/2687-1653-2023-23-3-231-240>
5. Mali RA, Gupta TVK, Ramkumar J. A Comprehensive Review of Free-Form Surface Milling – Advances over a Decade. *Journal of Manufacturing Processes*. 2021;62:132–167. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2020.12.014>
6. Marin F, Souza AF, Gaspar HS, Calleja-Ochoa A, López de Lacalle LN. Topography Simulation of Free-Form Surface Ball-End Milling through Partial Discretization of Linearised Toolpaths. *Engineering Science and Technology, an International Journal*. 2024;55:101757. <https://doi.org/10.1016/j.jestech.2024.101757>
7. Beňo J, Tomáš M, Ižol P, Varga J. Analysis of the Free Form Surface Milling Based on a Fragmentation Approach. *Journal of Production Engineering*. 2015;18(1):31–34.
8. Varga J, Tóth T, Kaščák L, Spišák E. The Effect of the Machining Strategy on the Surface Accuracy When Milling with a Ball End Cutting Tool of the Aluminum Alloy AlCu4Mg. *Applied Sciences*. 2022;12(20):10638. <https://doi.org/10.3390/app122010638>
9. Grešová Z, Ižol P, Vrabel M, Kaščák L, Brindza J, Demko M. Influence of Ball-End Milling Strategy on the Accuracy and Roughness of Free Form Surfaces. *Applied Sciences*. 2022;12(9):4421. <https://doi.org/10.3390/app12094421>
10. Cica D, Zeljkovic M, Sredanovic B, Tesic S. Optimization of Machining Parameters with Minimum Surface Roughness for Three-Axis Milling of Sculptured Parts. *Journal of Production Engineering*. 2017;20(2):75–78. <https://doi.org/10.24867/JPE-2017-02-034>
11. Ižol P, Vrabel M, Maňková I. Comparison of Milling Strategies in Case of Free Form Surface Milling. *Materials Science Forum*. 2016;862:18–25. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.862.18>
12. Mgherony A, Mikó B. Tool Path Planning of Ball-End Milling of Free-Form Surfaces as a Search Algorithm. *Acta Technica Jaurinensis*. 2024;17(2):75–83. <https://doi.org/10.14513/actatechjaur.00736>
13. Kukreja A, Pande SS. Estimation of Scallop Height in Freeform Surface Machining. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2019;103:167–181. <https://doi.org/10.1007/s00170-019-04269-x>
14. Ngoc Tuyen Bui, Duc Luong Ngo. An Experimental Study of 3 Axes CNC Milling for a Blade of the Axial Flow Pump Impeller. In: *Proc. Int. Conf. on Material, Machines and Methods for Sustainable Development*. Cham: Springer; 2021. P. 330–336. https://doi.org/10.1007/978-3-030-99666-6_11
15. Van Quy Hoang, Bui Ngoc Tuyen. Effect of Feed Rate, Tool Path and Step over on Geometric Accuracy of Freeform Surfaces When 3 Axis CNC Milling. *Applied Mechanics and Materials*. 2019;889:107–114. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.889.10>

15. Киреев С.О., Лебедев А.Р., Корчагина М.В. Оптимизация геометрических характеристик циклоидальных профилей героторных гидромашин. *Advanced Engineering Research (Rostov-on-Don)*. 2023;23(3):269–282. <https://doi.org/10.23947/2687-1653-2023-23-3-269-282>

Kireyev SO, Lebedev AR, Korchagina MV. Optimization of Geometric Characteristics of Cycloidal Profiles of Gerotor Hydraulic Machines. *Advanced Engineering Research (Rostov-on-Don)*. 2023;23(3):269–282. <https://doi.org/10.23947/2687-1653-2023-23-3-269-282>

16. Radzevich SP. *Kinematic Geometry of Surface Machining*. Boca Raton, FL: CRC Press; 2007. 536 p.

17. Roy RK. *A Primer on the Taguchi Method*, 2nd ed. Southfield, MI: SME; 2010. 300 p.

18. Stephenson DA, Agapiou JS. *Metal Cutting Theory and Practice*, 3rd ed. Boca Raton, FL: CRC Press; 2016. 956 p.

19. Kalpakjian S, Schmid SR. *Manufacturing Engineering and Technology*, 7th ed. Singapore: Pearson; 2020. 407 p.

Об авторах:

Нгок Туен Буй, доктор технических наук, доцент, начальник отдела механической обработки материалов и промышленного инструмента инженерной школы машиностроения Ханойского университета науки и технологий (01, ул. Дай Ко Вьет, Ханой, 11626, Вьетнам), [ORCID](#), [ScopusID](#), [ResearcherID](#), [ResearchGate](#), tuyen.buingoc@hust.edu.vn

Нгуен Тхо Ван, доктор технических наук, факультет технологий и инженерии Хайфонского университета (171, ул. Фан Данг Луу, Хайфон, 04617, Вьетнам), [ORCID](#), [ResearcherID](#), [ResearchGate](#), thonv@dhhp.edu.vn

Заявленный вклад авторов:

Нгок Туен Буй: разработка концепции, разработка методологии, курирование данных, формальный анализ, написание черновика рукописи.

Нгуен Тхо Ван: проведение исследования, визуализация, написание черновика рукописи, написание рукописи – рецензирование и редактирование.

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

About the Authors:

Ngoc Tuyen Bui, Dr.Sci. (Eng.), Associate Professor, Head of the Division of Material Machining and Industrial Tools, School of Mechanical Engineering, Hanoi University of Science and Technology (01, Dai Co Viet Str., Hanoi city, 11626, Vietnam), [ORCID](#), [ScopusID](#), [ResearcherID](#), [ResearchGate](#), tuyen.buingoc@hust.edu.vn

Nguyen Tho Van, Dr.Sci. (Eng.), Faculty of Technology and Engineering, Haiphong University (171, Phan Dang Luu Str., Haiphong city, 04617, Vietnam), [ORCID](#), [ResearcherID](#), [ResearchGate](#), thonv@dhhp.edu.vn

Claimed Contributorship:

Ngoc Tuyen Bui: conceptualization, methodology, data curation, formal analysis, writing — original draft preparation.

Nguyen Tho Van: investigation, visualization, writing — original draft preparation, writing — review & editing.

Conflict of Interest Statement: the authors declare no conflict of interest.

All authors have read and approved the final version of manuscript.

Поступила в редакцию / Received 16.03.2026

Поступила после рецензирования / Reviewed 29.04.2026

Принята к публикации / Accepted 20.05.2026

МАШИНОСТРОЕНИЕ И МАШИНОВЕДЕНИЕ

MACHINE BUILDING AND MACHINE SCIENCE



УДК 621.791

Оригинальное эмпирическое исследование

<https://doi.org/10.23947/2687-1653-2026-26-2-2288>

Количественная оценка кривизны формы проплавления в зависимости от взаиморасположения электродов при наплавке расщепленной дугой в среде защитного газа



EDN: KDYZBG

Я.П. Скобликов  , С.Б. Сапожков 

Санкт-Петербургский государственный морской технический университет,
г. Санкт-Петербург, Российская Федерация

✉ iakov98sp@gmail.com

Аннотация

Введение. Повышение эффективности дуговой наплавки плавящимся электродом является одним из ключевых направлений развития современного производства. Особый интерес представляет наплавка расщеплённым плавящимся электродом в среде защитного газа. Взаиморасположение электродов для данного способа наплавки сказывается на зоне проплавления, а именно на ее форме и кривизне. Форма проплавления влияет на градиент свойств и эксплуатационную надёжность покрытия. Влияние взаиморасположения электродов на кривизну фронта проплавления остаётся количественно не оценённым. Целью настоящего исследования являются определение корреляции кривизны формы проплавления в зависимости от взаиморасположения электродов и ее количественная оценка.

Материалы и методы. Исследование влияния взаиморасположения электродов на форму проплавления проводилось путем наплавки шести слоёв и последующего анализа формы проплавления основного металла. В качестве влияющих факторов были выбраны расстояние между электродами (z) и угол их наклона (α). Процесс наплавки осуществлялся в среде защитного газа Ar/CO₂ в соотношении 98/2 %. Для выявления зоны проплавления поперечные сечения слоёв были протравлены. Границы зон проплавления оцифрованы. Для определения функций, описывающих форму проплавления, использовался полином степени 6. Для анализа формы проплавления выполнялось дифференцирование полученных функций. Дифференциал первого порядка использовался для определения количества экстремумов. Для оценки кривизны формы проплавления использовался метод расчета среднего значения модуля второй производной для значений, лежащих в пределах ширины слоя. Установление корреляции выполнялось по методике Пирсона.

Результаты исследования. В ходе проведённого эксперимента дана количественная оценка кривизны формы проплавления в зависимости от взаиморасположения электродов. Определены функции, описывающие профили проплавления. Вычислены кривизна полученных профилей и количество экстремумов. Установлены коэффициенты корреляции между межэлектродным расстоянием, углом наклона электродов, кривизной проплавления и количеством экстремумов. Сделан вывод о том, что кривизна формы проплавления и количество экстремумов слабо зависят от межэлектродного расстояния. Угол наклона электродов в большей степени определяет кривизну проплавления. Выявлен эффект демпфирования теплового потока электрической дуги объемом сварочной ванны при межэлектродном расстоянии в 15 мм.

Обсуждение. Зона проплавления основного металла для каждого опыта имеет седловатую форму. Увеличение угла развала электродов приводит к формированию более пологой формы проплавления из-за изменения вектора действия электромагнитных сил, влияющих на потоки плазмы и капли расплавленного металла. Возникновение демпфирующего эффекта объясняется тем, что при сближении электродов объём сварочной ванны увеличивается. Между электрической дугой и основным металлом возникает прослойка жидкого металла с высокой теплоемкостью и низкой теплопроводностью, за счет этого происходит демпфирование тепла от электрической дуги.

Заключение. Проведённое исследование позволило количественно оценить влияние взаиморасположения электродов на кривизну формы проплавления, а также определить степень влияния межэлектродного расстояния и угла наклона электродов на кривизну формы проплавления. Установлено слабое влияние межэлектродного расстояния

на кривизну формы проплавления и количество экстремумов. Коэффициенты корреляции для данных параметров равны $-0,22$ и $0,43$. Влияние угла наклона электродов на кривизну формы проплавления и количество экстремумов оценивается как существенное. Коэффициенты корреляции для данных параметров равны $-0,65$ и $-0,71$. С увеличением угла наклона электродов относительно вертикали кривизна формы проплавления уменьшается.

Ключевые слова: наплавка расщепленной дугой, GMAW, многопроволочная наплавка, взаимное расположение электродов, зона проплавления

Благодарности. Авторы выражают благодарность редакционной коллегии журнала и рецензенту за профессиональный анализ статьи и рекомендации для ее корректировки.


Для цитирования. Скобников Я.П., Сапожков С.Б. Количественная оценка кривизны формы проплавления в зависимости от взаиморасположения электродов при наплавке расщепленной дугой в среде защитного газа. *Advanced Engineering Research (Rostov-on-Don)*. 2026;26(2):2288 <https://doi.org/10.23947/2687-1653-2026-26-2-2288>

Original Empirical Research

Quantitative Evaluation of Fusion Zone Curvature Correlation with Electrode Positioning in Shielded Gas Split-Arc Surfacing

Iakov P. Skoblikov  , Sergey B. Sapozhkov 

Saint Petersburg State Marine Technical University, Saint Petersburg, Russian Federation

 iakov98sp@gmail.com

Abstract

Introduction. Improving the efficiency of arc surfacing with a consumable electrode is one of the key vectors in the development of modern manufacturing. Split-arc gas-shielded welding with a consumable electrode is of particular interest. The electrode arrangement in this welding process affects the fusion zone, namely its shape and curvature. The shape of the penetration zone significantly affects the property gradient and the operational reliability of the coating. The effect of the electrode arrangement on the curvature of the penetration front remains quantitatively unassessed. The objective of this study is to quantitatively evaluate and determine the correlation of the curvature of the penetration shape depending on the relative arrangement of the electrodes.

Materials and Methods. The effect of electrode positioning on the penetration shape was studied by building up six layers and subsequently analyzing the fusion shape in the base metal. The selected influencing parameters were the interelectrode distance (z) and the electrode inclination angle (α). The surfacing process was performed in an Ar/CO₂ shielding gas atmosphere in a ratio of 98/2%. To make the fusion zone visible, the transverse cross-sections of the layers were subjected to etching. The fusion zone boundaries were digitized. A 6th-degree polynomial was used to determine the functions describing the penetration shape. The obtained functions were differentiated to analyze the fusion shape. The first-order derivative was used to determine the number of extremes. To assess the curvature of the penetration shape, the average value of the absolute second derivative was calculated over the range of values within the layer width. Correlation was established using Pearson's method.

Results. As a result of the conducted experiment, a quantitative assessment of the curvature of the penetration shape depending on the relative arrangement of the electrodes was performed. Functions describing the penetration shapes were determined. The curvature of the obtained shapes and the number of extremes were calculated. Correlation coefficients between the interelectrode distance, the electrode inclination angle, the penetration curvature, and the number of extremes were determined. It was found that the curvature of the penetration shape and the number of extremes weakly depend on the interelectrode distance. The electrode inclination angle determines the penetration curvature to a greater extent. A damping effect of the heat flux of the electric arc by the volume of the weld pool was identified at an interelectrode distance of 15 mm.

Discussion. In each experiment, the base metal fusion zone displayed a saddle-shaped geometry. Increasing the electrode included angle resulted in a shallower penetration shape, attributed to an alteration in the vector of electromagnetic forces that govern plasma streams and molten metal droplet transfer. The damping effect occurred because reducing the interelectrode distance enlarged the weld pool. A layer of molten metal, possessing high heat capacity but low thermal conductivity, separated the electric arc from the base metal, thus damping the heat flux from the arc.

Conclusion. The conducted study made it possible to quantitatively assess the effect of the electrode arrangement on the curvature of the penetration shape, as well as to determine the degree of influence of the interelectrode distance and the electrode inclination angle on the curvature of the penetration shape. The interelectrode distance was found to have a weak effect on both the fusion shape curvature and the number of extremes. The correlation coefficients for these parameters were $-0,22$ and $0,43$. The effect of the electrode inclination angle on both the fusion shape curvature and the number of extremes was considered substantial. The correlation coefficients for these parameters were $-0,65$ and $-0,71$. As the angle of inclination of the electrodes relative to the vertical increased, the curvature of the penetration shape decreased.

Keywords: split-arc surfacing, GMAW, multiwire surfacing, mutual arrangement of electrodes, fusion zone

Acknowledgements. The authors would like to thank the Editorial board of the journal and the reviewers for their professional analysis of the article and valuable recommendations for its improvement.

For Citation. Skoblikov IP, Sapozhkov SB. Quantitative Evaluation of Fusion Zone Curvature Correlation with Electrode Positioning in Shielded Gas Split-Arc Surfacing. *Advanced Engineering Research (Rostov-on-Don)*. 2026;26(2):2288. <https://doi.org/10.23947/2687-1653-2026-26-2-2288>

Введение. В современных условиях развития промышленности, аддитивных технологий одним из ключевых факторов конкурентоспособности является повышение производительности различных производственных процессов, позволяющих сократить цикл производства и снизить себестоимость изготавливаемой продукции. К таким процессам можно отнести нанесение металлических покрытий методом наплавки плавящимся электродом в среде защитного газа (GMAW) [1]. Известно, что увеличение производительности данного способа наплавки путем повышения скорости подачи проволоки приводит к усилению мощности электрической дуги и вследствие этого к росту глубины проплавления основного металла, возникновению брызг, подрезов, выгоранию легирующих элементов.

Существует другой подход к увеличению производительности данного способа наплавки. Он заключается в увеличении количества проволок, подаваемых в сварочную ванну, а не в увеличении скорости их подачи. В работе [2] представлены итоги изучения этого метода. Один из них гласит, что при увеличении количества проволок в системе наплавки происходит экспоненциальный рост производительности за счёт более эффективного использования тепла электрической дуги.

Наплавка расщепленным электродом является одним из способов многопроволочной наплавки, который был разработан на основе вышеупомянутого подхода. Сущность данного способа заключается в том, что через токоподвод подаётся не одна, а несколько присадочных проволок. При этом подключение токоподвода выполняется к одному источнику тока [3]. Наплавка данным способом применяется для решения задач, связанных с нанесением антикоррозионных, износостойких покрытий или ремонтом деталей.

Для нанесения антикоррозионных покрытий необходимо добиваться минимального проплавления основного металла с ровной границей. Данная характеристика проплавления обеспечивает минимальную долю участия основного металла в наплавленном слое. В работе [4], посвящённой изучению влияния рода тока на форму проплавления при наплавке расщепленным электродом под слоем флюса, косвенно представлено влияние расстояния между электродами на форму проплавления. В работе отмечается, что при наплавке с межэлектродным расстоянием в 10–12 мм формируется седловатая форма проплавления. Несмотря на это, данная форма проплавления допустима для выполнения антикоррозионной наплавки при отсутствии несплавления в верхней точке седла и сохранении доли участия основного металла в диапазоне 15–25 %. Оценка кривизны формы проплавления, установление ее корреляции в зависимости от взаиморасположения электродов в работе отсутствуют.

Авторы статьи [5] отмечают, что при нанесении износостойких покрытий использование криволинейной формы проплавления обеспечивает более надежное сцепление слоёв с основным металлом, в отличие от пологой формы проплавления. В работе [6], посвящённой комплексному изучению форм проплавления при различных способах дуговой наплавки, подчеркивается: кривизна формы проплавления определяет характер перехода наплавленного металла к основному, что оказывает влияние на концентрацию напряжений в наплавленном металле, определяет градиент смещения основного металла в наплавленном и влияет на свойства наплавленного металла.

Авторами [7] способ двухпроволочной наплавки был успешно применён в рамках аддитивного производства. Данный факт делает этот способ актуальным при выполнении ремонтных работ и выращивании деталей, где характер перехода наплавленного металла от слоя к слою имеет существенное значение. Таким образом, можно сделать вывод, что для решения задач, связанных с нанесением функциональных покрытий, одним из параметров качества является морфология зоны проплавления основного металла.

Влияние взаиморасположения электродов на форму проплавления обусловлено изменением электромагнитных сил в дуговом промежутке и характера тепломассопереноса. Раскрывая данную тему, авторы проанализировали ряд работ, посвящённых процессам, протекающим в дуговом промежутке при наплавке данным способом. В работе [8] определены силы, действующие на каплю и расплавленный металл при наплавке плавящимся электродом с импульсным питанием, а в работе [9] описано изменение этих сил в рамках двух рядом расположенных электродов. Установлено, что при близком расположении электродов на каплю расплавленного металла и поток плазмы влияет сила Лоренца, направленная в межэлектродное пространство. Влияние этой силы способствует изменению траектории падения капель и уменьшению давления электрической дуги. В работе [10] описан процесс моделирования распределения тепла в электрической дуге, возникающей на расщеплённом электроде, и установлено, что распределение тепла в расщеплённой дуге зависит от расстояния между электродами и силы тока. При определённых значениях силы тока и межэлектродного расстояния тепловое поле в электрической дуге принимает одновершинное или двухвершинное строение. Данное распределение теплового потока является важным фактором, определяющим форму проплавления.

В статье [11] выделено два ключевых параметра взаиморасположения электродов, влияющих на форму проплавления. Этими параметрами являются угол наклона электродов относительно вертикали и расстояние между электродами. Таким образом, установлено, что при выборе оптимального режима наплавки необходимо определять не только силу тока, но и взаиморасположение электродов. Данный вывод совпадает с выводом, сделанном авторами статьи [10]. В исследовании, изложенном в статье [12], выявлено влияние угла наклона рабочей головки на формирование наплавленного слоя при наплавке углом вперед. Определено, что оптимальный угол наклона лежит в диапазоне от 10 до 30°. При таком расположении головки удалось получить слои шириной 25 мм с долей участия основного металла в 30–33%. Расстояние между электродами составляло 6 мм. В качестве электродов использовалась проволока марки Inconel 625. Наплавку выполняли под слоем флюса.

По результатам анализа научных работ по представленной теме можно заключить, что изучение формы проплавления при наплавке расщепленным электродом в среде защитного газа актуально при нанесении функциональных покрытий, ремонте деталей и аддитивном выращивании. Взаиморасположение электродов при наплавке этим способом существенно влияет на силы, действующие в дуговом промежутке, и на теплоперенос электродного металла. Изменение формы проплавления в зависимости от расстояния между электродами и угла наклона электродов для такого процесса наплавки изучено недостаточно полно. Выявленный научный пробел заключается в отсутствии количественных данных об изменении формы проплавления в зависимости от расстояния между электродами и угла их наклона относительно вертикальной плоскости. В связи с этим цель настоящего исследования — дать количественную оценку и определить корреляцию кривизны формы проплавления в зависимости от взаиморасположения электродов. Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

1. Установить количество экстремумов и кривизну функции, описывающей форму проплавления, для каждого опыта.
2. Определить величины корреляции межэлектродного расстояния с кривизной формы проплавления и с количеством экстремумов, а также угла наклона электродов с кривизной формы проплавления и с количеством экстремумов.

Материалы и методы. Для оценки кривизны формы проплавления в зависимости от конфигурации электродов выполнена наплавка плоских слоев с различным расстоянием между электродами и углом между ними. Перемещение рабочего инструмента выполнялось с использованием робота Fanuc 120iD (Япония). Питание электрической дуги осуществлялось от импульсного источника питания EWM Titan XQ500 (Германия). Наплавочная головка состояла из двух горелок, закрепленных на регулируемом кронштейне. В качестве подложек использовались пластины из стали Ст3 размером 150×70×20 мм. Наплавка выполнялась в режиме GMAW-Pulse проволокой Св-08Г2С диаметром 1,2 мм. Химический состав проволоки представлен в таблице 1. В качестве защитного газа использовалась смесь газов — Ar (98%) и CO₂ (2%). Такая газовая смесь, по сравнению со смесями с большим содержанием CO₂, имеет сниженную окислительную способность, за счет чего в процессе наплавки возникает меньше неметаллических включений. Для визуализации макроструктуры наплавленного слоя выполнялось травление образцов электролитическим методом в растворе хлорида натрия (NaCl) с концентрацией 200 г/л. Перед травлением образцы были отполированы. Травление проводилось с плотностью тока 7–10 А/дм². В качестве катода выступал стержень из стали 12Х18Н10Т, на конце которого был закреплен тампон. Травление выполнялось методом протирки образца до выявления структуры. Данный способ травления был выбран как один из доступных способов на момент проведения исследования. Измерение формы проплавления проведено с использованием ПО Digimizer (версия 6.5.1).

Таблица 1

Химический состав проволоки Св-08Г2С (мас. %)

C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Cu
0,05–0,11	0,70–0,95	1,80–1,90	≤0,030	≤0,025	≤0,025	≤0,020	≤0,025

В качестве независимых факторов, определяющих взаимное расположение горелок, были выбраны расстояние между электродами (z) и угол их наклона относительно вертикальной плоскости (α). При проведении эксперимента наплавка выполнялась с одинаковым вылетом (SO), равным 20 мм. На рис. 1 представлены компоновка электродов во время наплавки и исследованные параметры.

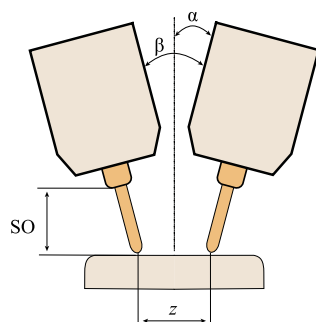


Рис. 1. Схема компоновки [11]

Наплавка слоев выполнялась при скорости подачи проволоки (WFS), равной 6,5 м/мин для одной горелки. Так как в процессе наплавки использовалось две горелки, общая скорость подачи проволоки составляла 13 м/мин. Перемещение рабочего инструмента происходило с постоянной линейной скоростью (TS), равной 4 мм/с. В процессе наплавки фиксировались значения силы тока (I) и напряжения (U), регистрация которых осуществлялась по показаниям амперметра и вольтметра, интегрированных в источник питания. Для поддержания схожей тепловой картины при проведении опытов использовались одинаковые подложки. Перед наплавкой слоя подложки были зачищены до металлического блеска и подогреты до температуры (МВТ), равной 150 °С. Подогрев выполнялся с целью имитации реальных технологических условий, при которых ведутся производственные работы, и проводился газовой горелкой. Контроль температуры осуществлялся тепловизором НIKMICRO В20. Расход защитного газа для каждой из горелок составлял 15 л/мин. Общий расход газа — 30 л/мин. В таблице 2 приведен режим наплавки.

Таблица 2

Режим наплавки

WFS, м/мин	I, А	U, В	TS, мм/с	МВТ, °С	SO, мм	Газ, л/мин
13	420	25	4	150	20	30

План эксперимента включал в себя шесть опытов с различными параметрами z (1Cr, 18, 21 мм) и α (5°, 10°). Образцы для анализа отбирались на участке, составляющем 3/4 длины наплавленного слоя. План эксперимента представлен в таблице 3. На рис. 2 показана фотография образца с линией его рассечения.

Таблица 3

План эксперимента

Опыт	z , мм	α , °
1	15	5
2	18	5
3	21	5
4	15	10
5	18	10
6	21	10



Рис. 2. Внешний вид образца

Для оценки влияния взаимного расположения электродов на форму проплавления в программе Digimizer были определены ее границы. На рис. 3 представлено фото макрошлифов с очерченными границами.

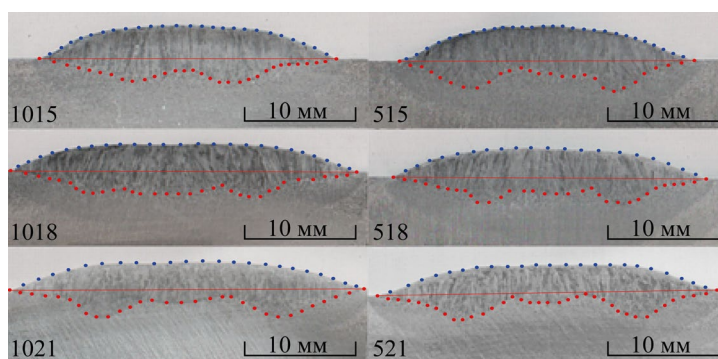


Рис. 3. Фото макрошлифов с очерченными границами [5]

Так как при наплавке расщепленной дугой два источника тепла располагаются симметрично относительно вектора движения, то и форма проплавления условно является симметричной. Для оценки формы проплавления было решено зеркально отразить и наложить измеренные значения друг на друга относительно оси слоя и инвертировать значения по оси Y. На рис. 4 показана данная методика. В результате проделанной операции удалось представить данные как точки в системе координат XY, где X — ширина проплавления от оси слоя, а Y — глубина проплавления. Причем ось Y является осью наплавленного слоя.

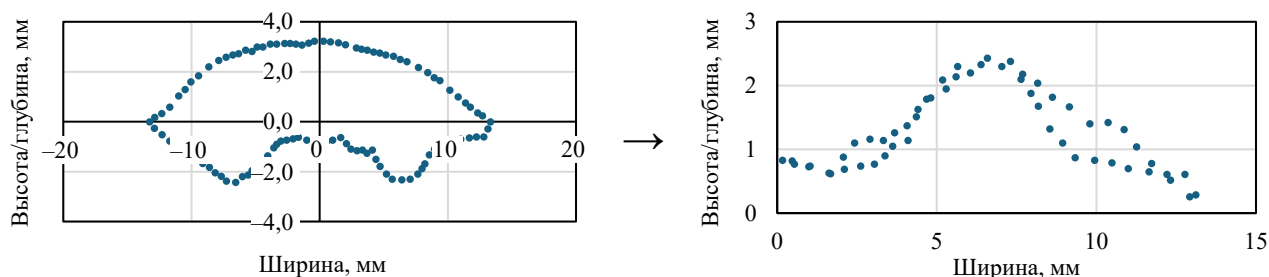


Рис. 4. Процесс обработки данных

Для оценки кривизны формы проплавления на основе измеренных данных определена регрессионная функция каждого профиля. Для описания всех кривых использовался полином шестой степени. Первая производная уравнений, описывающих форму проплавления, использовалась для определения количества экстремумов. Вторая производная применялась для количественной оценки кривизны. Кривизна формы проплавления для каждого опыта вычислялась как среднее значение модуля второй производной для точек, лежащих в пределах ширины слоя. Корреляция кривизны формы проплавления и экстремумов в зависимости от расстояния между электродами и угла их наклона вычислялась по методике Пирсона.

Результаты исследования. Определены уравнения регрессии, описывающие форму проплавления. Коэффициент детерминации составил более 0,9. Уравнения представлены в таблице 4.

Таблица 4

Уравнения регрессии

№	X ⁶	X ⁵	X ⁴	X ³	X ²	X ¹	Const	R ²
515	-0,000075	0,002839	-0,0385	0,216	-0,41	0,15	0,83	0,91
1015	-0,000003	-0,000049	0,0039	-0,050	0,17	0,16	0,75	0,90
518	-0,000070	0,002942	-0,0449	0,296	-0,77	0,46	1,87	0,93
1018	-0,000013	0,000466	-0,0058	0,027	-0,04	-0,02	2,08	0,92
521	-0,000035	0,001672	-0,0292	0,222	-0,67	0,60	1,02	0,92
1021	-0,000052	0,002405	-0,0413	0,315	-0,99	1,00	0,65	0,92

На рис. 5 даны графики, иллюстрирующие форму проплавления и характер ее изменения в зависимости от угла наклона электродов при одинаковом расстоянии между ними. На рис. 6 изображены графики, описывающие форму проплавления и характер ее изменения в зависимости от расстояния между электродами, для экспериментов с фиксированным углом наклона.

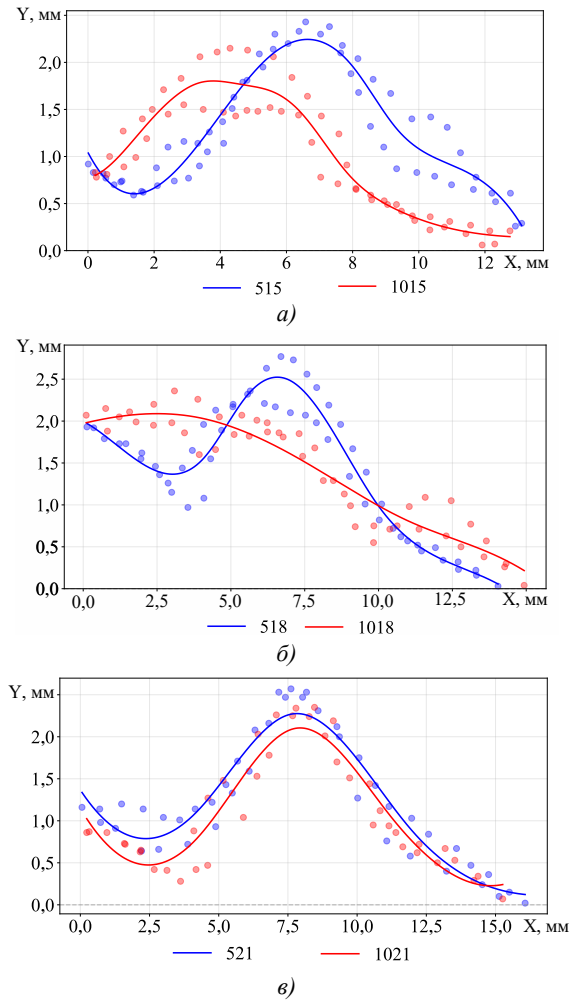


Рис. 5. Форма и характер изменения проплавления для угла в 5 и 10°:
 а — для z = 15 мм; б — для z = 18 мм; в — для z = 21 мм

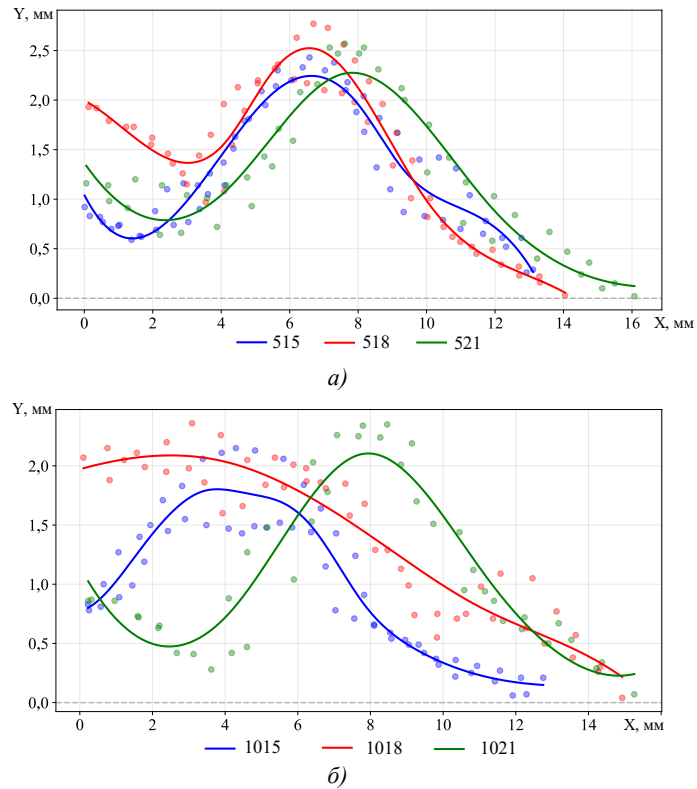


Рис. 6. Форма и характер изменения проплавления при Z = 15, 18, 21 мм:
 а — угол наклона электродов 5°; б — угол наклона электродов 10°

На приведенных графиках видно, что для всех опытов характерна криволинейная седловатая форма проплавления. Кривые, описывающие форму проплавления, имеют один или два экстремума в зависимости от конфигурации электродов.

На рис. 7 представлены графики, показывающие изменение кривизны формы проплавления в зависимости от взаимного расположения электродов. Цифры 1 и 2 указывают количество экстремумов на кривой, описывающих форму проплавления.

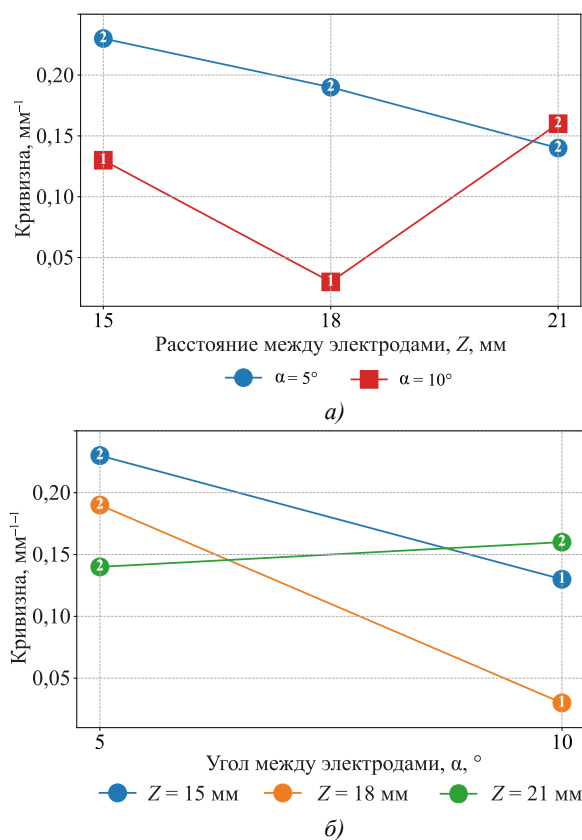


Рис. 7. Графики зависимости кривизны зоны проплавления:
a — от расстояния между электродами; *б* — от угла между электродами

Для опытов с межэлектродным расстоянием в 21 мм величина кривизны формы проплавления лежит в районе $0,15 \text{ мм}^{-1}$. Зона проплавления имеет два экстремума. Для опытов с расстоянием между электродами в 18 и 15 мм величина кривизны формы проплавления зависит от угла наклона электродов. При угле наклона 10° форма проплавления имеет кривизну, равную $0,03 \text{ мм}^{-1}$ и $0,14 \text{ мм}^{-1}$ соответственно. Количество экстремумов равно единице. При уменьшении угла до 5° кривизна увеличивается до $0,19 \text{ мм}^{-1}$ и $0,24 \text{ мм}^{-1}$ соответственно. Количество экстремумов становится равным двум.

В таблице 5 представлена матрица, полученная в ходе оценки величины корреляции кривизны формы проплавления и количества экстремумов в зависимости от расстояния между электродами и угла их наклона.

Таблица 5

Корреляционная матрица

	Z	α	Кривизна	Экстремумы
Z	1	-0,08	-0,22	0,43
α	-0,08	1	-0,65	-0,71
Кривизна	-0,22	-0,65	1	0,36
Экстремумы	0,43	-0,71	0,36	1

Коэффициент корреляции расстояния между электродами с кривизной формы проплавления равен $-0,22$, а с количеством экстремумов — $0,43$. Коэффициент корреляции угла наклона с кривизной формы проплавления равен $-0,65$, а с количеством экстремумов — $-0,71$.

Обсуждение. Форма проплавления основного металла характеризуется наличием осевой зоны (P1) и основной зоны (P2) проплавления. Основная зона проплавления формируется непосредственно под действием источника тепла. Возникновение осевой зоны проплавления обусловлено суперпозицией тепловых полей от каждого источника тепла и тепловым воздействием потоков плазмы, устремляющихся в область между электродами [13]. На рис. 8 дано схематическое изображение зоны проплавления при наплавке расщепленной дугой.

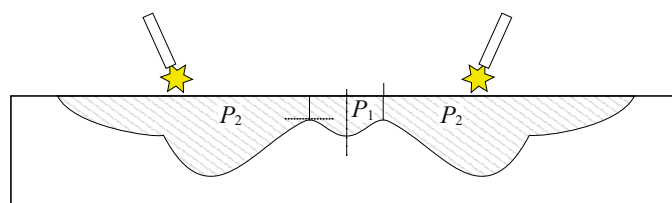


Рис. 8. Схематическое изображение зоны проплавления при наплавке расщепленным электродом

Анализ кривизны формы проплавления показывает, что при расстоянии между электродами в 21 мм она не зависит от угла наклона электродов. При наплавке с данной конфигурацией электродов электрические дуги ведут себя как независимые источники тепла. Об этом говорят схожая форма проплавления, значение кривизны формы в районе $0,15 \text{ мм}^{-1}$ и равное количество экстремумов. При уменьшении расстояния между электродами до 18 или 15 мм кривизна формы проплавления становится зависимой от угла наклона электродов. С увеличением угла наклона электродов проплавление становится более пологим. Об этом свидетельствует уменьшение кривизны формы проплавления и количества экстремумов. Для опытов с расстоянием между электродами в 18 мм уменьшение кривизны проплавления происходит на 84 %, а для опытов с расстоянием между электродами в 15 мм — на 42 %.

Согласно результатам оценки корреляции, связь между межэлектродным расстоянием (z) и кривизной формы проплавления является слабой (коэффициент Пирсона $r = -0,22$), а связь между межэлектродным расстоянием и количеством экстремумов является умеренной ($r = -0,43$). Корреляция между углом наклона электродов (α) и кривизной формы проплавления определена как умеренная, близкая к сильной ($r = -0,65$), тогда как корреляция угла наклона с количеством экстремумов оценивается как сильная ($r = -0,71$).

Изменение кривизны формы проплавления в зависимости от взаимного расположения электродов связано с изменением вектора сил, действующих на каплю в дуге. В работе [14] проанализированы силы, действующие на каплю при GMAW-наплавке. При отрыве капли на нее действуют сила тяжести, электромагнитная сила и сила, обусловленная воздействием потоков плазмы. При наплавке расщепленным электродом из-за взаимодействия электромагнитных полей соседних дуг возникает сила Лоренца, отклоняющая столб дуги и каплю к оси шва [15]. В результате капли расплавленного металла падают не строго под электрод, а со смещением к оси шва. Это подтверждается результатами скоростной видеосъемки процесса тандемной сварки, представленными в работе [16]. Данное смещение приводит к формированию более пологой формы проплавления.

Стоит заметить, что минимальное значение кривизны формы проплавления, равное $0,03 \text{ мм}^{-1}$, возникает при межэлектродном расстоянии в 18 мм и угле их наклона к вертикали в 10° . При сближении электродов до 15 мм форма проплавления становится более крутой несмотря на сближение источников тепла и усиление действия радиальной составляющей электромагнитной силы.

Сравнение результатов экспериментов показывает, что при наплавке с параметром $z = 15 \text{ мм}$ ширина наплавленного слоя меньше. Однако из-за равного объема расплавленного электродного материала толщина (или высота) данного слоя оказывается больше. На рис. 9 представлен график зависимости высоты и ширины наплавленного слоя от расположения электродов [11].

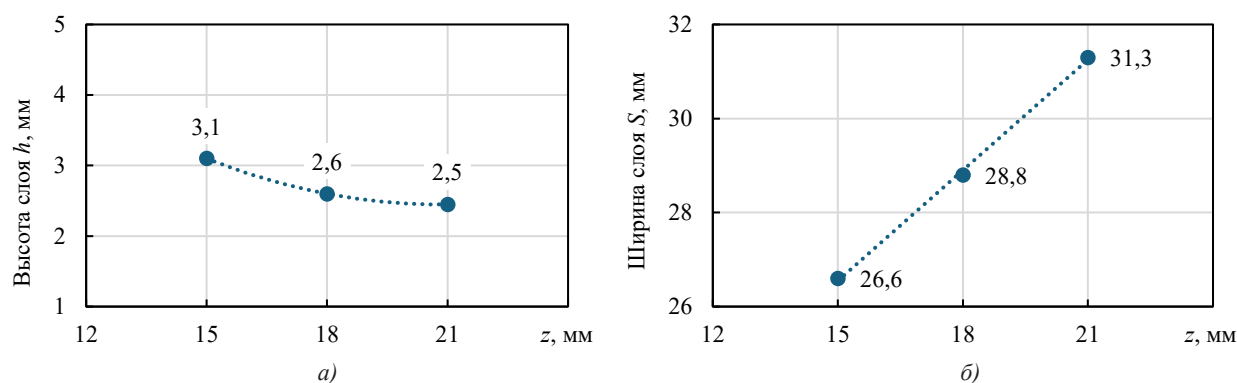


Рис. 9. Габариты слоя в зависимости от расположения электродов:
а — высота слоя; б — ширина слоя [11]

Следовательно, можно сделать вывод, что при наплавке с меньшим расстоянием между электродами формируется сварочная ванна с большей толщиной. Между электрической дугой и основным металлом возникает прослойка жидкого металла с высокой теплоемкостью и низкой теплопроводностью. По этой причине возникает эффект демпфирования теплового потока и уменьшения температурных колебаний в сварочной ванне. Этот эффект описан в работе [17].

С практической точки зрения полученные результаты позволяют более ясно сформировать понимание процессов, происходящих при изменении взаиморасположения электродов, и послужить опорой для определения режима наплавки с использованием других сварочных материалов. Для нанесения антикоррозионных покрытий рекомендуется использовать режим наплавки с углом наклона электродов в 10° и расстоянием в 15–18 мм. Такое взаиморасположение электродов дает возможность получать зону проплавления с меньшей кривизной. Благодаря этому в наплавленном слое возникает равномерное распределение химических элементов. Для выполнения ремонтных наплавки рекомендуется выбирать расположение электродов с углом наклона электродов в 5° , а расстояние между электродами — в 15 мм. При этом угле наклона электродов и межэлектродном расстоянии форма проплавления имеет наибольшую кривизну, благодаря чему прочность сцепления такой наплавки с основным металлом больше, по сравнению с наплавкой с полой формой проплавления [6].

По результатам проведенной работы установлено слабое влияние расстояния между электродами на кривизну формы проплавления и количество экстремумов. Коэффициент корреляции для данных параметров равен $-0,22$ и $0,43$. Влияние угла наклона электродов относительно вертикали на кривизну формы проплавления и количество экстремумов оценивается как существенное. Коэффициент корреляции для данных параметров равен $-0,65$ и $-0,71$. С увеличением угла наклона электродов относительно вертикали кривизна формы проплавления уменьшается.

Наплавка с межэлектродным расстоянием в 18 мм и уменьшением угла наклона электродов на 5° приводит к уменьшению кривизны проплавления на 84 %. Для опытов с межэлектродным расстоянием в 15 мм — на 42 %.

Определено изменение кривизны формы проплавления от толщины сварочной ванны за счет эффекта демпфирования теплового потока прослойкой расплавленного металла.

Заключение. В настоящей работе дана оценка влияния взаимного расположения электродов на кривизну формы проплавления при наплавке расщепленным электродом в среде защитного газа. Определены регрессионные функции, описывающие форму проплавления для каждого из шести опытов, установлено количество экстремумов и проведен расчет кривизны каждой кривой проплавления. Рассчитаны коэффициенты корреляции исследуемых параметров.

Показано, что для всех рассмотренных конфигураций электродов форма проплавления является криволинейной и седловатой. Установлено, что при межэлектродном расстоянии $z = 21$ мм кривизна формы проплавления не зависит от угла наклона электродов и составляет около $0,15 \text{ мм}^{-1}$, а дуги ведут себя как независимые источники тепла. При уменьшении расстояния до $z = 18$ мм и $z = 15$ мм кривизна формы проплавления приобретает выраженную зависимость от угла наклона электродов α . С увеличением угла форма проплавления становится более полой, что свидетельствует об усилении электромагнитного взаимодействия между дугами и смещении капель электродного металла к оси шва.

По результатам корреляционного анализа установлено, что связь между межэлектродным расстоянием z и кривизной формы проплавления является слабой ($r = -0,22$), тогда как угол наклона электродов α обнаруживает умеренную, близкую к сильной корреляцию с кривизной формы проплавления ($r = -0,65$) и сильную корреляцию с количеством экстремумов ($r = -0,71$). Таким образом, угол наклона электродов является более значимым управляющим параметром формы проплавления, чем межэлектродное расстояние.

Полученные результаты применимы к условиям только проведенного исследования. При использовании прикладной проволоки иных марок количественные показатели будут отличаться, однако физические механизмы, определяющие влияние взаиморасположения электродов на форму проплавления, остаются неизменными.

Практическая значимость работы состоит в том, что полученные данные позволяют обоснованно подходить к выбору конфигурации электродов при наплавке функциональных покрытий, когда форма и кривизна проплавления непосредственно определяют долю участия основного металла в наплавленном слое и характер концентрации напряжений.

Перспективным направлением дальнейших исследований является моделирование процесса теплопереноса при наплавке расщепленным плавящимся электродом с различным взаиморасположением электродов и разработка модели источника тепла, позволяющей осуществлять данный процесс наплавки методом конечных элементов.

Список литературы / References

1. Rui Xiang, Jiankang Huang, Xiaoquan Yu, Huayu Zhao, Ding Fan. A Review of Double-Electrode GMAW: Approaches, Developments and Variants. *Journal of Manufacturing Processes*. 2025;133:1160–1182. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2024.12.017>
2. Tušek J. Mathematical Modelling of Melting Rate in Arc Welding with a Triple-Wire Electrode. *Journal of Materials Processing Technology*. 2004;146(3):415–423. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2003.12.006>
3. Елсуков С.К., Соколов Г.Н., Зорин И.В., Фастов С.А., Полуниин И.А. Исследование дугового процесса при наплавке расщепленным электродом в смеси защитных газов. *Известия Волгоградского государственного технического университета*. 2020;237(2):62–66. <https://doi.org/10.35211/1990-5297-2020-2-237-62-66>
4. Елсуков С.К., Фастов С.А., Зорин И.В., Лысак В.И., Несин Д.С. Применение модулированного переменного тока для двухэлектродной наплавки под флюсом. *Известия ВолГТУ*. 2023;281(10):53–59. <https://doi.org/10.35211/1990-5297-2023-10-281-53-59>
5. Иванов В.П., Лаврова Е.В. Управление формированием зоны проплавления при электродуговой наплавке. *Автоматическая сварка*. 2016;(8):6–11. <https://doi.org/10.15407/as2016.08.01>
6. Рябцев И.А., Кусков Ю.М., Переpletчиков Е.Ф., Бабинец А.А. *Наплавка. Управление проплавлением основного металла и формированием наплавленных слоев*. Киев: Интерсервис; 2021. 392 с.
7. Ryabtsev IA, Kuskov YuM, Perepletchikov EF, Babinets AA. *Surfacing. Control of Penetration of the Base Metal and Formation of Deposited Layers*. Kiev: Interservis; 2021. 392 p. (In Russ.)
8. Filomeno Martina, Jialuo Ding, Stewart Williams, Armando Caballero, Gonçalo Pardal, Luisa Quintino. Tandem Metal Inert Gas Process for High Productivity Wire Arc Additive Manufacturing in Stainless Steel. *Additive Manufacturing*. 2019;25:545–550. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2018.11.022>
9. Junling Hu, Hailung Tsai. Heat and Mass Transfer in Gas Metal Arc Welding. Part I: The Arc. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2007;50(5-6):833–846. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2006.08.025>
10. Kaiyuan Wu, Peimin Xie, Zhao Liu, Min Zeng, Zhuoyong Liang. Investigation of Double Arc Interaction Mechanism and Quantitative Analysis of Double Arc Offset in High-Power Double-Wire DP-GMAW. *Journal of Manufacturing Processes*. 2020;49:423–437. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2019.10.022>
11. Ding Xueping, Li Huan, Wei Huiliang. Numerical Analysis of Arc Plasma Behavior in Double-Wire GMAW. *Vacuum*. 2016;124:46–54. <https://doi.org/10.1016/j.vacuum.2015.11.006>
12. Skoblikov IP, Efimov EI, Murzin VV. Study of Effect of Electrode Arrangement on Layer Geometry and Fusion Zone Morphology under Twin-Arc Surfacing. *Advanced Engineering Research (Rostov-on-Don)*. 2025;25(3):208–220. <https://doi.org/10.23947/2687-1653-2025-25-3-208-220>
13. Зорин И.В., Елсуков С.К., Соколов Г.Н., Дубцов Ю.Н., Лысак В.И., Харламов В.О. Исследование процесса наплавки расщепленным электродом сплава Inconel 625. *Сварочное производство*. 2018;11:9–15.
14. Zorin IV, Elsukov SK, Sokolov GN, Dubtsov YuN, Lysak VI, Kharlamov VO. Investigation of the Alloy Inconel 625 Deposition Process by a Split Electrode. *Welding Production*. 2018;11:9–15.
15. Xiaoli Wang, Yangsen Liu, Qi Zhang. Numerical Analysis Arc Behavior in Single-Power Double-Wire Single-Arc Gas Metal Arc Welding. *Results in Engineering*. 2025;26:105538. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2025.105538>
16. Xiaochao Zhang, Hongming Gao, Zhiwei Li. Forces Analysis of Droplets and Accurate Control of Metal Transfer in GMAW by Utilizing Droplet Resonance. *Journal of Manufacturing Processes*. 2021;70:121–131. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2021.08.028>
17. Kaiyuan Wu, Qianrun Chen, Zitao Liu. Effect of Phase Shift on Arc Interference and Weld Bead Formation in Aluminum Alloy Tandem GMAW with a Median Pulsed Waveform. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2022;120(12):8013–8030. <https://doi.org/10.1007/s00170-022-09200-5>
18. Kaiyuan Wu, Haoran Yang, Jing Lin, Yonghua Sh, Min Zeng, Xiaobin Hong. Novel Double-Wire GMAW Arc Length Control Method Based on PID with Derivative on Measurement. *Journal of Manufacturing Processes*. 2025;150:827–842. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2025.06.060>
19. Kaiyuan Wu, Shuxiang Liang, Jiaqi Li, Liemin Liao, Hao Huang, Xiaobin Hong. Metal Transfer Behavior in Aluminum Alloy Multi-Phase Double-Wire High-Frequency Pulsed GMAW. *Vacuum*. 2026;246:115020. <https://doi.org/10.1016/j.vacuum.2025.115020>

Об авторах:

Яков Павлович Скобликов, аспирант кафедры «Сварка судовых конструкций» Санкт-Петербургского государственного морского технического университета (190121, Российская Федерация, г. Санкт-Петербург, ул. Лоцманская, 3), [SPIN-код](#), [ORCID](#), [ScopusID](#), [ResearchGate](#), iakov98sp@gmail.com

Сергей Борисович Сапожков, доктор технических наук, профессор кафедры «Сварка судовых конструкций» Санкт-Петербургского морского технического университета (190121, Российская Федерация, г. Санкт-Петербург, ул. Лоцманская, 3), [SPIN-код](#), [ORCID](#), [ScopusID](#), wh13@bk.ru

Заявленный вклад авторов:

Я.П. Скобликов: разработка концепции, проведение исследования, разработка методологии, визуализация.

С.Б. Сапожков: написание рукописи – внесение замечаний и исправлений.

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

About the Authors:

Iakov P. Skoblikov, Postgraduate student of the Department of Welding of Ship Structures, Saint Petersburg State Marine Technical University (3, Lotsmanskaya Str., Saint Petersburg, 190121, Russian Federation), [SPIN-code](#), [ORCID](#), [ScopusID](#), [ResearchGate](#), iakov98sp@gmail.com

Sergey B. Sapozhkov, Dr.Sci. (Eng.), Professor of the Department of Welding of Ship Structures, Saint Petersburg State Marine Technical University (3, Lotsmanskaya Str., Saint Petersburg, 190121, Russian Federation), [SPIN-code](#), [ORCID](#), [ScopusID](#), wh13@bk.ru

Claimed Contributorship:

IP Skoblikov: conceptualization, investigation, methodology, visualization.

SB Sapozhkov: writing – review & editing.

Conflict of Interest Statement: the authors declare no conflict of interest.

All authors have read and approved the final manuscript.

Поступила в редакцию / Received 06.03.2026

Поступила после рецензирования / Reviewed 01.04.2026

Принята к публикации / Accepted 08.04.2026