

ТОМ 26, №3, 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 №3, 2026 в свет</i>	30.09.2026





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.3,2026</i>	30.09.2026



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 Гиллеси, 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)

Курейчик 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)

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

Сумбатян 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)

Турдиалиев 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 Алвазли, 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)

Хухан Ляо, профессор, научный сотрудник ИААМ Старший член Школы бизнеса IEEE, 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. Solov'yev, Dr.Sci. (Phys.-Math.), Professor, Crimean Engineering and Pedagogical University the name of Fevzi Yakubov (Simferopol, Republic of Crimea)

Batyr M. Yazyev, 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.), Wroclaw 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, Raphael 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. Aizikovitch, Dr.Sci. (Phys.-Math.), Professor, Don State Technical University (Rostov-on-Don, Russian Federation)

Tamaz M. Natriashvili, Academician, Raphael 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. Ereemev, 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

Сравнительный анализ турбулентных моделей при описании работы аппарата погружного горения
В.А. Демин, А.В. Костыря

Совершенствование эффективности проектирования, надежности и безопасной эксплуатации бесферменных кровельных систем на основе механического расчета узлов соединения кровли с балочным основанием

Сачин Балкришна Мулай, Сурья Пракаш

Нейросетевая технология мониторинга поврежденного состояния протяженной конструкции на основе анализа нестационарных волн

О.К. Абраха, А.Н. Соловьев

МАШИНОСТРОЕНИЕ И МАШИНОВЕДЕНИЕ

Контроль технического состояния подъемных сооружений и оборудования с использованием искусственных нейронных систем

Р.В. Хван, А.А. Короткий

ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

Исследование методов распознавания эмоций человека на основе цифрового анализа изображений

С.А. Филичкин, С.В. Вологдин

Теоретико-множественный подход к разработке показателей оценки производственной и логистической деятельности промышленных предприятий

И.Д. Котляров

Оптимизация функций управления адаптивной беговой платформой для систем опорно-двигательной реабилитации

А.А. Волков, М.А. Дудин, Д.Л. Дедов, А.Д. Обухов

Метод граничных и конечных элементов в динамических пространственных задачах для слоистых тел с частично-заглубленными объектами

С.Г. Глушко, А.А. Ляпин

Расчётная оценка влияния разрядности ШИМ-управления LED-досветкой на фотосинтетический отклик растений

В.В. Самойленко, В.В. Федоренко

Математическая модель воспроизводства человеческого капитала предприятий в условиях внедрения технологий искусственного интеллекта

А.И. Сухинов, К.А. Харитонов, Е.А. Угнич

Интеллектуальная модель прогнозирования технологических нарушений электролиза алюминия типа «конус» на основе методов ансамблевого обучения

А.С. Михалев, Т.Г. Пенькова, Л.Ф. Ноженкова

Contents

MECHANICS

Comparative Analysis of Turbulence Models for the Description of the Operation of a Submerged Combustion Apparatus

Vitaly A. Demin, Aleksey V. Kostyrya

Improving Design Efficiency, Reliability, and Safe Operation of Trussless Roofing Systems through Mechanics-Based Evaluation of Roof-to-Beam Base Connections

Sachin Balkrishna Mulay, Surya Prakash

Neural Network Technology for Monitoring the Damaged State of an Extended Structure Based on Analysis of Non-stationary Waves

Okbazghi Kibreab Abraha, Arkadiy N. Soloviev

MACHINE BUILDING AND MACHINE SCIENCE

Technical Condition Monitoring of Lifting Structures and Equipment Using Artificial Neural Systems

Roman V. Khvan, Anatoly A. Korotky

INFORMATION TECHNOLOGY, COMPUTER SCIENCE AND MANAGEMENT

A Study of Human Emotion Recognition Methods Based on Digital Image Analysis

Sergey A. Filichkin, Sergey V. Vologdin

A Set-Theoretic Approach to Development of Performance Indicators for Production and Logistics Activities of Industrial Enterprises

Ivan D. Kotliarov

Optimization of Control Functions of an Adaptive Treadmill Platform for Musculoskeletal Rehabilitation Systems

Andrey A. Volkov, Maxim A. Dudin, Denis L. Dedov, Artem D. Obukhov

Boundary and Finite Element Method in Dynamic Spatial Problems for Layered Bodies with Partially Embedded Objects

Sergey G. Glushko, Alexander A. Lyapin

Computational Assessment of the Effect of PWM Resolution in LED Supplementary Lighting on Plant Photosynthetic Response

Vladimir V. Samoylenko, Vladimir V. Fedorenko

A Mathematical Model for Human Capital Reproduction in Enterprises under Artificial Intelligence Adoption

Alexander I. Sukhinov, Kirill A. Kharitonov, Ekaterina A. Ugnich

An Intelligent Model for Predicting Spike Type Technological Process Disturbances in Aluminum Electrolysis Based on Ensemble Learning Technologies

Anton S. Mikhalev, Tatiana G. Penkova, Ludmila F. Nozhenkova

МЕХАНИКА
MECHANICS

УДК 004.94; 532.5

Оригинальное теоретическое исследование

<https://doi.org/10.23947/2687-1653-2026-26-3-2266>
Сравнительный анализ турбулентных моделей при описании
работы аппарата погружного горенияВ.А. Демин^{1,2} , А.В. Костыря² ¹ Пермский государственный национальный исследовательский университет, г. Пермь, Российская Федерация² Пермский национальный исследовательский политехнический университет, г. Пермь, Российская Федерация, <https://ror.org/05c0ns027> avkostyrja@pstu.ru

EDN: SWMOTQ

Аннотация

Введение. Совершенствование аппарата погружного горения (АПГ) предполагает исследование его внутренней гидродинамики. Известны работы по численному моделированию аппаратов для регазификации сжиженного природного газа. Однако эти установки в отличие от выпарных не обеспечивают высокоскоростной ввод газового потока. Таким образом, не вполне разработана методика численного моделирования выпарных АПГ, которыми нагревают концентрированные рассолы и загрязненные среды. Цель работы — сравнительный анализ моделей турбулентности для численного моделирования гидродинамики АПГ с обоснованием рекомендаций по их выбору. Реализуются три задачи. Первая — создание набора численных моделей АПГ. Вторая — численные эксперименты с ними. Третья — выявление их сходств и различий по количественным и качественным результатам экспериментов.

Материалы и методы. Для описания движения жидкости и газа в системе «жидкость – газ – твердые частицы» задействовали подход «Эйлер – Эйлер», для твердой фазы — «Эйлер – Лагранж». Уравнения турбулентных моделей последовательно включались в общую физико-математическую модель системы, которую замкнули эмпирическими соотношениями Шиллера – Науманна, Ишии – Зубера и Ранца – Маршалла. Задача решалась методом конечных объемов как в стационарном режиме, так и в нестационарном (здесь шаг по времени — 0,1 с). Турбулентность моделировали в гомогенной и гетерогенной постановках. Вычислительная среда — Ansys CFX. Ячейка сетки — 10 мм.

Результаты исследования. Для восьми моделей рассчитаны удельная энергия турбулентных пульсаций, скорость, объем и температура жидкости в ячейке. Максимум по первому показателю — 0,361 ($k - \omega$), минимум — 0,026 RNG ($k - \varepsilon$). По второму — 0,457 (DES) и 0,130 ($k - \omega$) соответственно. По третьему — 1,339 ($k - \omega$); 1,186 (DES). По четвертому — 58,7 (RNG $k - \varepsilon$); 28,2 ($k - \omega$). Визуализированы поля скоростей жидкости для обоих режимов. Показан низкий разброс значений массы осевшей твердой фазы (1,18–1,38 кг).

Обсуждение. EARSМ (Explicit Algebraic Reynolds Stresses Model) воспроизводит структуру потока, близкую к $k - \varepsilon$ и SST (Shear Stresses Transfer), что подтверждает достоверность их результатов. $k - \omega$ дает афизичный результат из-за отсутствия строгой симметрии поля скоростей. Гомогенная DES (Detached Eddy Simulation) воспроизводит максимальную асимметрию свободной поверхности жидкости. Полученный угол наклона (около 30°) не соответствует реальной гидродинамике в АПГ, значит, гомогенная DES неприменима. Установлены три случая наибольшей надежности: гомогенная $k - \omega$ (симметрия потока, минимальная средняя температура); гетерогенная RNG $k - \varepsilon$ (максимальная средняя температура); гомогенная DES (максимальная деформация поверхности). SST рекомендуется для стационарных режимов, LES (Large Eddy Simulation) и гетерогенная SST — для процессов в динамике.

Заключение. При численном моделировании АПГ счет оказался условно устойчивым. За отдельными исключениями модели турбулентности в целом равнозначны. Приводятся рекомендации по использованию моделей в стационарном и нестационарном режиме. В перспективе будут детально изучены причины воспроизводства моделями крайних результатов по температуре и искривлению поверхности.

Ключевые слова: погружное горение, многофазный поток, затопленная газожидкостная струя, турбулентность

© Демин В.А., Костыря А.В., 2026

Благодарности. Авторы выражают благодарность руководству пермского НПФ «ТеплоЭнергоПром» за участие в выполнении задачи, актуальной для горно-химической промышленности. Также авторы благодарны редакции и рецензентам за внимательное отношение к статье и замечания, которые позволили повысить ее качество.

Для цитирования. Демин В.А., Костыря А.В. Сравнительный анализ турбулентных моделей при описании работы аппарата погружного горения. *Advanced Engineering Research (Rostov-on-Don)*. 2026;26(3):2266. <https://doi.org/10.23947/2687-1653-2026-26-3-2266>

Original Theoretical Research

Comparative Analysis of Turbulence Models for the Description of the Operation of a Submerged Combustion Apparatus

Vitaly A. Demin^{1,2} , Aleksey V. Kostyrya²  

¹ Perm State National Research University, Perm, Russian Federation

² Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russian Federation, <https://ror.org/05c0ns027>

 avkostyrja@pstu.ru

Abstract

Introduction. Improving the submerged combustion apparatus (SCA) requires a detailed understanding of its internal hydrodynamic behavior. There are studies on the numerical modeling of liquefied natural gas regasification units. However, these units, unlike vaporizers, do not provide high-velocity gas flow injection. Therefore, the methodology for numerical modeling of SCV (Submerged Combustion Vaporizer) used to heat concentrated brines and contaminated media has not been fully developed. The objective of this study is a comparative analysis of turbulence models for numerical simulation of aerodynamic flow paths and substantiation of recommendations for their selection. Three tasks are solved. The first is the creation of a set of numerical SCA models. The second involves numerical experiments with them. The third is the identification of their similarities and differences based on quantitative and qualitative experimental results.

Materials and Methods. The Eulerian–Eulerian approach was used to describe the motion of liquid and gas in the liquid–gas–solid particle system, while the Eulerian–Lagrangian approach was used for the solid phase. The equations of the turbulence models were sequentially incorporated into a general physicomathematical model of the system, which was closed by the empirical relations of Schiller–Naumann, Ishii–Zuber, and Rantz–Marshall. The problem was solved using the finite volume method in both steady-state and transient modes (with a time step of 0.1 s). Turbulence was simulated in homogeneous and heterogeneous settings. The computational environment was Ansys CFX. The grid cell size was 10 mm.

Results. For the eight turbulence models, the specific turbulent kinetic energy, velocity, liquid volume, and liquid temperature were calculated at the computational cell level. The maximum for the first indicator was 0.361 ($k - \omega$), the minimum was 0.026 RNG ($k - \epsilon$). For the second — 0.457 (DES) and 0.130 ($k - \omega$), respectively. According to the third — 1.339 ($k - \omega$); 1.186 (DES). According to the fourth — 58.7 RNG ($k - \epsilon$); 28.2 ($k - \omega$). The velocity fields were visualized for both modes. A low scatter of the deposited solid phase mass was observed (1.18–1.38 kg).

Discussion. The EARS (Explicit Algebraic Reynolds Stresses Model) reproduces a flow structure similar to $k - \epsilon$ and SST (Shear Stresses Transfer), thereby confirming the reliability of their results. The $k - \omega$ model yields an unphysical result due to the lack of strict symmetry of the velocity field. The homogeneous DES (Detached Eddy Simulation) predicts maximum free-surface asymmetry. The resulting inclination angle (approximately 30°) does not correspond to the actual hydrodynamics in the SCA; therefore, the homogeneous DES is inapplicable. Three cases of greatest reliability have been established: homogeneous $k - \omega$ (flow symmetry, minimum average temperature); heterogeneous RNG $k - \epsilon$ (maximum average temperature); homogeneous DES (maximum surface deformation). SST is recommended for stationary modes, LES (Large Eddy Simulation) and heterogeneous SST — for dynamic processes.

Conclusion. In numerical simulations of the SCA, the calculations have proved to be conditionally stable. With a few exceptions, the turbulence models are generally equivalent. Recommendations are provided for using the models in steady-state and transient modes. In the future, the reasons for the extreme temperature and surface curvature results produced by the models will be studied in detail.

Keywords: submerged combustion, multiphase flow, submerged gas-liquid jet, turbulence

Acknowledgements. The authors would like to thank the management of Perm NPF TeploEnergoProm for their participation in completing the task, which is critical for the mining and chemical industry. The authors are also grateful to the editors and reviewers for the specified comments that improved the quality of the article.

For Citation. Demin VA, Kostyrya AV. Comparative Analysis of Turbulence Models for the Description of the Operation of a Submerged Combustion Apparatus. *Advanced Engineering Research (Rostov-on-Don)*. 2026;26(3):2266. <https://doi.org/10.23947/2687-1653-2026-26-3-2266>

Введение. Аппараты погружного горения (АПГ) представляют собой теплотехнические устройства для прямого нагрева и выпаривания растворов. Состав нагревается при непосредственном контакте со струей горячих дымовых газов, образующихся в камере сгорания. Преимущество такого способа нагрева — отсутствие теплопередающих поверхностей, на которых выпадают осадки солей. При работе АПГ струя дымовых газов контактирует с жидкостью и разбивается на пузырьки, которые барботируют через слой жидкости и отдают ей тепло. В жидкости возникает турбулентный поток из-за высокоскоростного ввода струи дымовых газов. Значит, течения в аппарате рассчитываются по одной из моделей турбулентности. Известно несколько классов таких моделей [1].

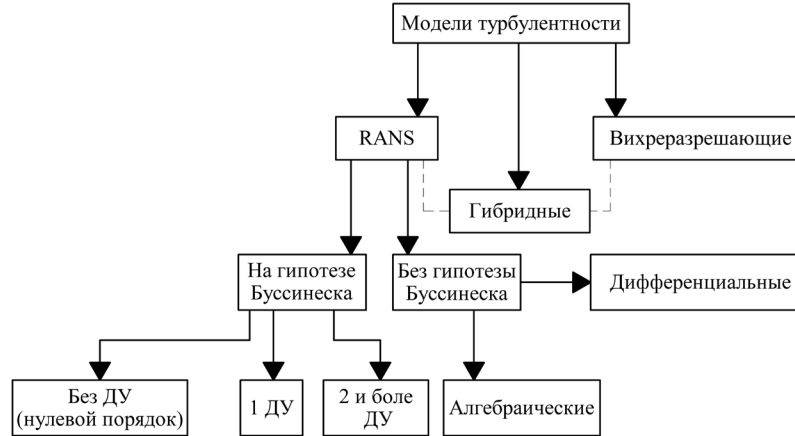


Рис. 1. Классификация моделей турбулентности

На рис. 1 приводится укрупненная схема классификации турбулентных моделей. Большинство из них относятся к классу RANS — Reynolds averaged Navier – Stokes (осредненные по Рейнольдсу уравнения Навье – Стокса). Суть осреднения заключается в замене истинной скорости на осредненную по ансамблю скорость [2]:

$$\bar{\mathbf{v}} = \langle \bar{\mathbf{v}} \rangle + \mathbf{v}' \quad (1)$$

Здесь $\mathbf{v}$ — истинная скорость; $\langle \bar{\mathbf{v}} \rangle$ — осредненная скорость; $\mathbf{v}'$ — пульсации скорости. Уравнение Навье – Стокса принимает вид:

$$\rho \frac{D\bar{\mathbf{v}}}{Dt} = -\nabla p + \nabla \cdot \left(\mu \nabla \langle \bar{\mathbf{v}} \rangle - \bar{\boldsymbol{\tau}} \right), \quad (2)$$

$$\bar{\boldsymbol{\tau}} = \rho \langle \mathbf{v}'_i \mathbf{v}'_j \rangle \quad (3)$$

Уравнение (3) представляет собой тензор напряжений Рейнольдса. Уравнение (2) останется незамкнутым до тех пор, пока не определятся компоненты тензора. Модели класса RANS определяют тензор напряжений Рейнольдса.

Подкласс моделей, использующих гипотезу Буссинеска [3], основан на положении о пропорциональности тензора напряжений и тензора скоростей деформаций. При этом коэффициентом пропорциональности является турбулентная вязкость, и ее определение становится ключом к описанию движения жидкости. Для вычисления турбулентной вязкости предложен ряд моделей, отличающихся количеством используемых дифференциальных уравнений (ДУ). Известны модели:

- без ДУ (модели нулевого порядка, описанные в работах Прандтля [4] и Кармана [5]);
- с одним ДУ (Спаларт – Аллмарас) [6];
- двумя и более ДУ ($k - \varepsilon$ [7], $k - \omega$ [8], $k - \varepsilon - v^2$ [9]).

Альтернативное моделирование турбулентности в рамках RANS предполагает отход от гипотезы Буссинеска [10]. С математической точки зрения напряжения Рейнольдса представляют собой вторые одноточечные моменты пульсаций скорости, и уравнения переноса этих величин можно строго вывести из выражений Навье – Стокса:

$$\frac{\partial}{\partial t} \langle \mathbf{v}'_i \mathbf{v}'_j \rangle + \langle \mathbf{v}_k \rangle \frac{\partial}{\partial x_k} \langle \mathbf{v}'_i \mathbf{v}'_j \rangle = \frac{\partial}{\partial x_k} D_{ijk} + P_{ij} + \Phi_{ij} - \varepsilon_{ij}. \quad (4)$$

Здесь D_{ijk} — диффузионный член, P_{ij} — генерационный член, Φ_{ij} — перераспределяющий член, ε_{ij} — диссипативный член. Определение связи между членами уравнения (4) составляет суть проблемы построения моделей переноса напряжений Рейнольдса. Можно использовать набор алгебраических и дифференциальных уравнений.

Вихреразрешающие модели вместо процедуры осреднения напряжений реализуют процедуру фильтрации переменных [11]:

$$\bar{\Phi}(x) = \frac{1}{V} \int_V \Phi(x') dx', \quad x' \in V. \quad (5)$$

Крупномасштабные турбулентные вихри разрешаются напрямую с помощью отфильтрованных переменных. Мелкомасштабные вихри, размер которых меньше размера ячейки расчетной сетки, разрешаются с применением подсеточных моделей. Наиболее известная из них — симуляция крупных вихрей (large eddy simulation, LES). В пределе, при стремящемся к нулю размере ячейки LES переходит в прямое численное моделирование турбулентности (direct numerical modeling, DNS), применяемое в настоящий момент лишь для фундаментальных исследований.

Комбинация RANS и разрешения вихрей — это база для класса гибридных моделей. Среди них отметим модель оторванных вихрей (detached eddy simulation, DES) [12], а также группу масштабно-адаптивных моделей (scale-adaptive simulation, SAS) [13]. Многообразие, с одной стороны, дает возможность гибкого выбора турбулентной модели, подходящей для конкретного расчетного случая, а с другой стороны, требует тщательного анализа и проверки моделей.

Для численных экспериментов используется абстрактное представление АПП — ячейка с затопленной струей и свободной поверхностью [14]. Ее схема представлена на рис. 2.

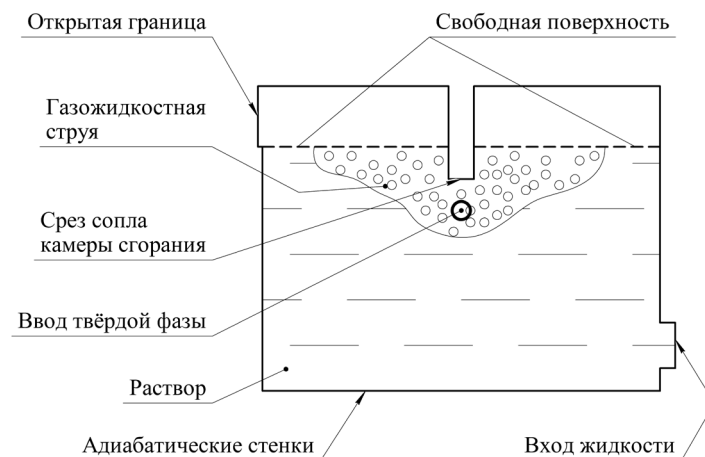


Рис. 2. Схема ячейки с затопленной струей и свободной поверхностью

С точки зрения вычислительной гидродинамики эта ячейка является сложным расчетным случаем. Сложность обусловлена пятью факторами:

- турбулентная часть в потоке;
- ламинарная часть в потоке;
- локальная неустойчивость в области ввода затопленной газожидкостной струи;
- дисперсная фаза (пузырьки газа);
- свободная деформируемая поверхность.

Рекомендации по описанию этих факторов противоречат друг другу¹. Предлагается многоскоростной континуум для моделирования пузырькового потока и односкоростной для моделирования свободной поверхности. Локально нестабильные потоки требуют применения вихреразрешающих моделей турбулентности, а ламинарные и турбулентные области — разрешения ламинарно-турбулентного перехода. Исследователи газлифтных [15] и барботажных [16] систем применяют модель $k - \epsilon$, однако в таких системах отсутствует скоростной ввод газожидкостной струи. Таким образом, весьма затруднительно сделать окончательный выбор турбулентной модели для рассматриваемой ячейки, основываясь лишь на предыдущих публикациях. В то же время национальная экономика нуждается в надежной технике для выпаривания концентрированных рассолов. Такие рассолы — это отходы производства калийных удобрений либо промежуточный продукт при подземном выщелачивании солей.

Материалы и методы. Для анализа рассматривались следующие модели турбулентности:

- $k - \epsilon$;
- $k - \epsilon$ с ренормализационными группами (RNG $k - \epsilon$);
- $k - \omega$;
- передача касательных напряжений (SST);
- явная алгебраическая модель Рейнольдсовых напряжений (EARSM);
- симуляция крупных вихрей (LES);
- симуляция оторванных вихрей (DES);
- нулевого порядка (zero equation).

¹ Ansys CFX Reference Guide. Release 2021 R1. Canonsburg: ANSYS Inc; 2021. 450 p.

Эти модели можно назвать общеприменимыми, так как все они есть в инженерном справочнике для работников химической промышленности [17]. Модель нулевого порядка, конечно же, не предназначена для решения подобного класса задач. Ее включили в эксперимент для косвенной верификации численной модели. Верификация будет считаться пройденной, если расчет с использованием модели нулевого порядка даст афизичные результаты или закончится ошибкой.

Рассматриваемые модели реализуют разные подходы к моделированию турбулентности:

– осреднение Рейнольдсовых напряжений с использованием гипотезы Буссинеска ($k - \varepsilon$, $k - \omega$, SST) и без нее (EARSМ);

– фильтрация коротковолновых колебаний скорости (LES и DES).

Кроме того, эти модели внедрены в вычислительные пакеты: CFX, Fluent, FlowVision, «Логос».

Уравнения рассматриваемых турбулентных моделей включались в общую физико-математическую модель исследуемой гидродинамической системы. Общая модель описывает многофазное течение, в котором несущая фаза — жидкость, а раздробленная — пузырьки газа и твердые частицы. Для расчета течения газовой фазы использовался подход «Эйлер – Эйлер» [18], а для твердой — «Эйлер – Лагранж» [19]. Межфазное взаимодействие вычисляется с помощью эмпирических соотношений:

– передача импульса между пузырьками и жидкостью — корреляция Ишии – Зубера [20];

– передача импульса между твердыми частицами и жидкостью — корреляция Шиллера – Науманна [21];

– передача тепла между пузырьками и жидкостью — корреляция Ранца – Маршалла [22].

На срезе сопла камеры сгорания вводятся пузырьки газа, для которых задается постоянный диаметр 3 мм. Плотность газа — переменная величина, что является следствием сильных изменений температуры газовой фазы вдоль линии тока.

Коалесценция пузырьков не рассчитывалась. В качестве газа задан воздух, так как теплофизические свойства дымовых газов близки к его свойствам при коэффициенте избытка воздуха 1,7. Место ввода твердой фазы расположено в гипоцентре камеры сгорания на некотором удалении от среза сопла. Удаление подобрано так, что область ввода находится внутри газожидкостной струи, в зоне максимальной теплонапряженности. Именно в этом месте в реальном процессе испаряется жидкость и, следовательно, выпадет осадок. Открытая граница позволяет жидкости выходить из расчетной области, а газу проникать в нее и частично выходить. На данном участке границы фактически задаются параметры газовой фазы за расчетной областью: все стенки — непроницаемые и адиабатические плюс условия прилипания. Дополнительно для нижней стенки (рис. 1) вводится условие полной абсорбции твердой фазы. Таким образом, имитируется осаждение твердых частиц на дно аппарата.

Уравнения физико-математической модели решались методом конечных объемов с помощью программного пакета для моделирования задач гидродинамики Ansys CFX 2019 R3.

Описание математической модели. Математическая модель ячейки основывается на уравнениях «Эйлер – Эйлер» и «Эйлер – Лагранж». Ниже представлены уравнения неразрывности, сохранения импульса и энергии:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\alpha_i \rho_i) + \nabla(\alpha_i \rho_i \vec{v}_i) = 0, \quad (6)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\alpha_i \rho_i \vec{v}_i) + \nabla(\alpha_i \rho_i \vec{v}_i \otimes \vec{v}_i) = -\alpha_i \nabla p + \nabla \vec{\tau}_i + \alpha_i \rho_i \vec{g} + \vec{F}_{drag,lg} + \vec{F}_{VM}, \quad (7)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\alpha_i \rho_i H_i) + \nabla(\alpha_i \rho_i \vec{v}_i H_i) = -\alpha_i \frac{\partial p}{\partial t} + \nabla \vec{\tau}_i : \nabla \vec{v}_i + \nabla(\lambda_i \nabla T_i) + Q_{ij}. \quad (8)$$

Тензор вязких напряжений из (7) и (8) вычисляется по соответствующим уравнениям упомянутых выше моделей турбулентности.

Закон движения для Лагранжевых частиц:

$$m_s \frac{d\vec{v}_i}{dt} = \vec{F}_{drag,lg} + \vec{F}_{grav}. \quad (9)$$

Силы в (7) и (9):

$$\vec{F}_{drag,lg} = \frac{3}{4} \rho_l C_D \frac{\alpha_l \alpha_g}{d_g} |\vec{v}_l - \vec{v}_g| (\vec{v}_l - \vec{v}_g),$$

$$\vec{F}_{drag,ls} = \frac{\pi d^2}{8} \rho_l C_D |\vec{v}_l - \vec{v}_s| (\vec{v}_l - \vec{v}_s),$$

$$\vec{F}_{VM} = C_{VM} \rho_l \alpha_g \left(\frac{D\vec{v}_g}{Dt} - \frac{D\vec{v}_l}{Dt} \right), \quad \vec{F}_{grav} = m_s \vec{g}.$$

В представленных уравнениях α — объемная доля; ρ — плотность, кг/м³; v — скорость, м/с; t — время, с; p — давление, Па; H — удельная энтальпия, Дж/кг; λ — теплопроводность, Вт/м·К; T — температура, К; Q — количество тепла, поступившее из фазы j , Дж/м³; c_p — теплоемкость при постоянном давлении, Дж/кг·К; d — диаметр, м; m — масса, кг. Векторы $\vec{g}$, $\vec{F}_{drag,ij}$, $\vec{F}_{VM}$, $\vec{F}_{grav}$ представляют собой ускорение свободного падения, м/с², удельную силу межфазного взаимодействия, Н/м³, удельную силу присоединенной массы, Н/м³ и силу тяжести, Н; τ — тензор вязких напряжений. Индексы i, j указывают на произвольные фазы. Индексы g, l, s отвечают газовой, жидкой и твердой фазам соответственно. C_{VM} — коэффициент присоединенной массы, задан 0,5. C_D — коэффициент сопротивления, вычисляемый по корреляции Шиллера – Науманна для твердых частиц или Ишии – Зубера для пузырьков газа.

К базовым уравнениям добавлены описанные ниже граничные и начальные условия.

Первое — срез сопла камеры сгорания (условия соответствуют опытной установке [23]):

$$G|_{сopл} = 0,123 \text{ кг/с}; \quad T|_{сopл} = 1300^\circ\text{C}; \quad \alpha_g|_{сopл} = 1; \quad \rho_g|_{сopл} = 0,225 \text{ кг/м}^3.$$

Второе — открытая граница:

$$p|_{op} = 101325 \text{ Па}; \quad T|_{op} = 25^\circ\text{C}; \quad \alpha_g|_{сopл} = 1.$$

Третье — вход жидкости:

$$G|_{вход} = 0,278 \text{ кг/с}; \quad T|_{вход} = 25^\circ\text{C}; \quad \alpha_g|_{вход} = 0; \quad \rho_l|_{сopл} = 997 \text{ кг/м}^3.$$

Четвертое — адиабатические стенки с учетом условия прилипания:

$$\vec{v}|_{cm} = 0; \quad q_n|_{cm} = 0.$$

Пятое — начальные условия:

$$\vec{v}_l|_{t=0} = 0; \quad \vec{v}_g|_{t=0} = 0; \quad T_l|_{t=0} = 25^\circ\text{C}; \quad T_g|_{t=0} = 25^\circ\text{C}.$$

Свободная поверхность жидкости ограничена плоскостью $z = 0,8$ м.

Приняты следующие размеры расчетной области: длина и ширина — 1,3 м, высота — 1 м. Количество узлов расчетной сетки по трем измерениям — 130:130:100. Использовалась равномерная тетраэдрическая сетка. Для проверки независимости результатов расчетов от размера ячейки сетки проводились численные эксперименты с использованием сеток различной крупности. Результаты этих экспериментов представлены в таблице 1.

Таблица 1

Средняя удельная энергия турбулентных пульсаций в зависимости от размера ячейки, Дж/кг

Ячейка, мм	Энергия
20	0,045
15	0,052
10	0,051

Как видно из таблицы 1, средняя энергия турбулентных пульсаций (ключевой параметр с точки зрения настоящего исследования) для сеток с ячейками 15 и 10 мм отличается на 0,001 Дж/кг, что составляет 2 % от полученных значений. Таким образом, для дальнейших расчетов можно использовать как сетку с ячейкой 15 мм, так и сетку с ячейкой 10 мм. Однако сетка с ячейкой 10 мм продемонстрировала большую устойчивость счета, поэтому именно ее приняли для дальнейшей работы.

Численные эксперименты проводились в стационарном и нестационарном режимах. Шаг по времени в нестационарном режиме — 0,1 с. В обоих режимах поочередно применялись одноконтинуальная (гомогенная) и многоконтинуальная (гетерогенная) постановки при моделировании турбулентности. Остальные физические величины вычислялись в гетерогенной постановке.

Результаты исследования. В результате вычислительных экспериментов получены следующие данные:

- средняя удельная энергия турбулентных пульсаций (таблица 2);
- средняя скорость жидкости в ячейке в конце расчета (таблица 3);
- объем жидкости в ячейке (таблица 4);
- средняя температура жидкости в ячейке (таблица 5).

В таблицах тип данных, которые нельзя получить в ходе эксперимента, обозначили *n/a*. Символ *x* указывает на случаи, когда расчет не завершен из-за ошибки решателя.

Таблица 2

Средняя удельная энергия турбулентных пульсаций, Дж/кг

Режим	Постановка	Модель							
		DES	LES	$k-\varepsilon$	RNG $k-\varepsilon$	$k-\omega$	SST	EARSM	Zero equation
Нестационарный	Гомогенная	0,131	<i>n/a</i>	<i>x</i>	<i>x</i>	<i>x</i>	0,211	<i>x</i>	<i>x</i>
	Гетерогенная	<i>x</i>	<i>x</i>	<i>x</i>	<i>x</i>	<i>x</i>	0,098	<i>x</i>	<i>x</i>
Стационарный	Гомогенная	–	–	0,065	0,068	0,361	0,142	<i>x</i>	<i>x</i>
	Гетерогенная	–	–	0,043	0,026	<i>x</i>	0,073	0,065	<i>x</i>

Таблица 3

Средняя скорость жидкости, м/с

Режим	Постановка	Модель							
		DES	LES	$k-\varepsilon$	RNG $k-\varepsilon$	$k-\omega$	SST	EARSM	Zero equation
Нестационарный	Гомогенная	0,457	0,292	<i>x</i>	<i>x</i>	<i>x</i>	0,402	<i>x</i>	<i>x</i>
	Гетерогенная	<i>x</i>	<i>x</i>	<i>x</i>	<i>x</i>	<i>x</i>	0,269	<i>x</i>	<i>x</i>
Стационарный	Гомогенная	–	–	0,236	0,244	0,130	0,240	<i>x</i>	<i>x</i>
	Гетерогенная	–	–	0,238	0,264	<i>x</i>	0,278	0,164	<i>x</i>

Таблица 4

Объем жидкости, м³

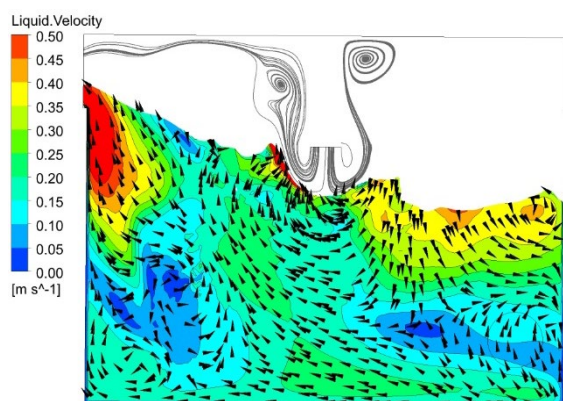
Режим	Постановка	Модель							
		DES	LES	$k-\varepsilon$	RNG $k-\varepsilon$	$k-\omega$	SST	EARSM	Zero equation
Нестационарный	Гомогенная	1,186	1,320	<i>x</i>	<i>x</i>	<i>x</i>	1,194	<i>x</i>	<i>x</i>
	Гетерогенная	<i>x</i>	<i>x</i>	<i>x</i>	<i>x</i>	<i>x</i>	1,338	<i>x</i>	<i>x</i>
Стационарный	Гомогенная	–	–	1,307	1,304	1,339	1,331	<i>x</i>	<i>x</i>
	Гетерогенная	–	–	1,297	1,299	<i>x</i>	1,271	1,331	<i>x</i>

Таблица 5

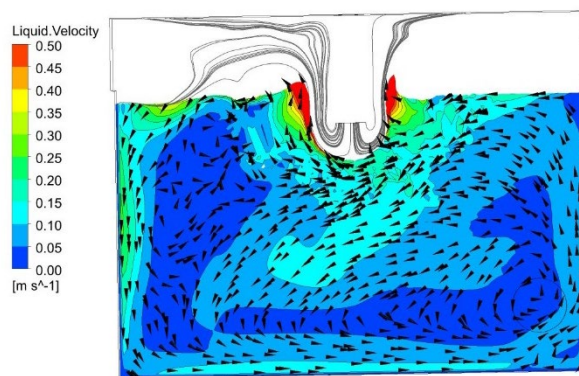
Средняя температура жидкости, °C

Режим	Постановка	Модель							
		DES	LES	$k-\varepsilon$	RNG $k-\varepsilon$	$k-\omega$	SST	EARSM	Zero equation
Нестационарный	Гомогенная	37,7	42,3	<i>x</i>	<i>x</i>	<i>x</i>	34,4	<i>x</i>	<i>x</i>
	Гетерогенная	<i>x</i>	<i>x</i>	<i>x</i>	<i>x</i>	<i>x</i>	33,7	<i>x</i>	<i>x</i>
Стационарный	Гомогенная	–	–	39,7	42,7	28,2	34,0	<i>x</i>	<i>x</i>
	Гетерогенная	–	–	44,0	58,7	<i>x</i>	37,6	32,5	<i>x</i>

На рис. 3 и 4 представлены поля скоростей жидкости с наложенными на них линиями тока пузырьков газа.



а)



б)

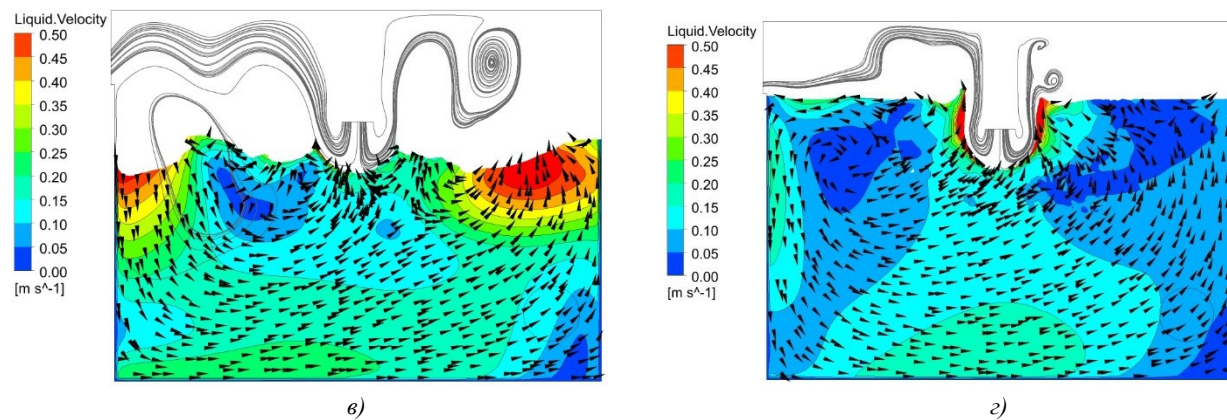
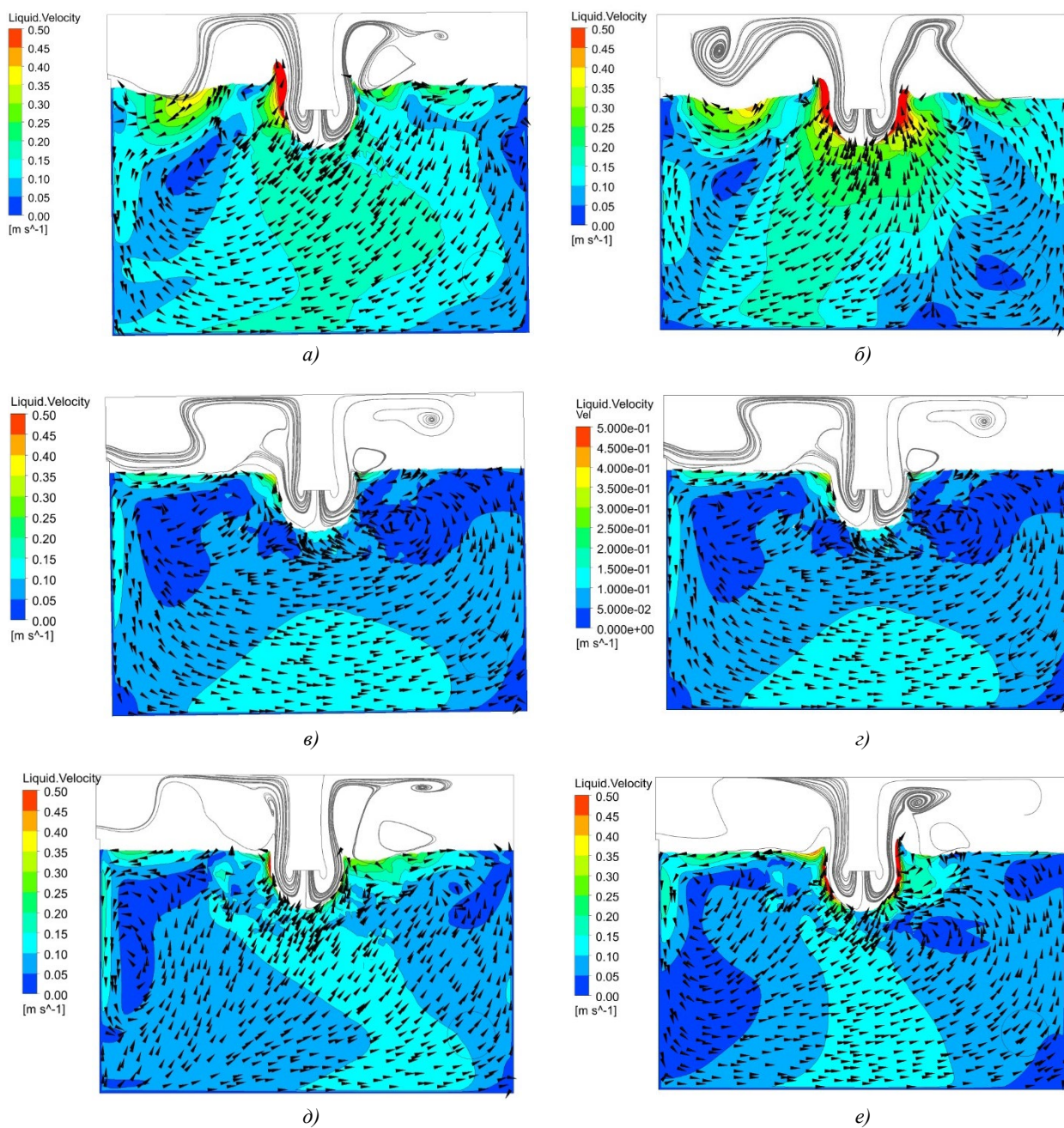


Fig. 3. Field of liquid velocities (non-stationary regime):
 a — DES homogeneous; b — LES homogeneous; b — SST homogeneous; z — SST heterogeneous



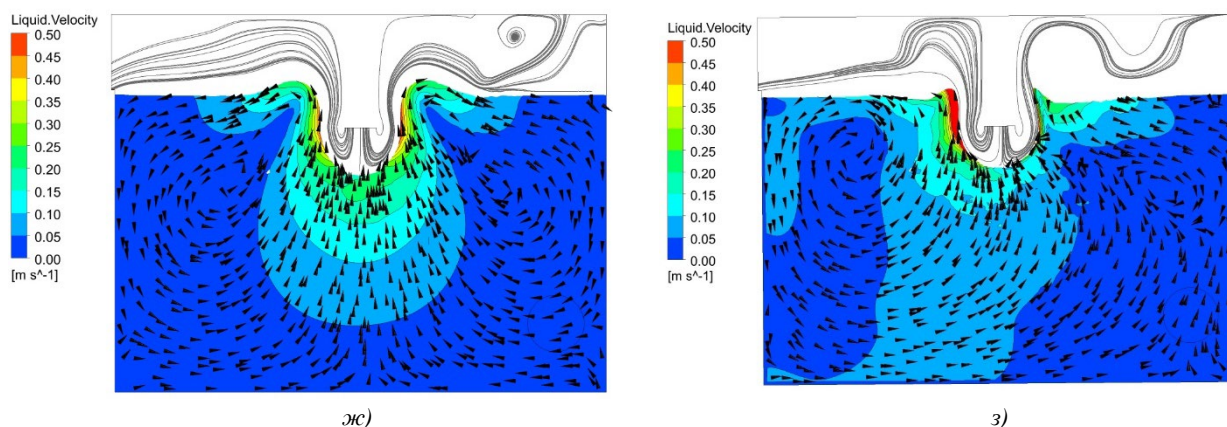


Рис. 4. Поле скоростей жидкости (стационарный режим): а — SST гомогенная; б — SST гетерогенная; в — $k - \epsilon$ гомогенная; г — $k - \epsilon$ гетерогенная; д — RNG $k - \epsilon$ гомогенная; е — RNG $k - \epsilon$ гетерогенная; ж — $k - \omega$ гомогенная; з — EARSМ гетерогенная

Дополнительно исследовано накопление твердой фазы на дне ячейки в нестационарном режиме. Вычислялась масса твердых частиц, коснувшихся нижней границы расчетной области за все время численного эксперимента (60 с). Данные представлены в таблицу 6.

Таблица 6

Масса осевшей твердой фазы, кг

Постановка	Модель		
	DES	LES	SST
Гомогенная	1,290	1,377	1,253
Гетерогенная	x	x	1,182

Как можно видеть, масса осевшей твердой фазы находится в диапазоне 1,18–1,38 кг, что говорит о низком разбросе значений. Разница между двумя постановками модели SST оказалась несущественной (6 %). Наименьшую разницу результатов дали гомогенная SST и DES модели (3 %), несмотря на различия в характере течения.

Обсуждение. Сравнение величин удельных турбулентных пульсаций (таблица 2) показывает, что все они имеют одинаковый порядок — десятые и сотые доли Джоулей на килограмм. При этом гомогенная постановка дает более высокие значения энергий пульсаций, чем гетерогенная.

Величины средних скоростей жидкости (таблица 3) также принадлежат к одному порядку — десятым долям метров в секунду. Разброс значений энергий пульсации и скоростей невелик.

Значения объема жидкости (таблица 4) в расчетной области принимают близкие значения для стационарного режима. Исключение — гетерогенная SST модель со значением объема на $0,04 \text{ м}^3$ ниже среднего для остальных моделей. В нестационарном же режиме модели DES и гомогенная SST дают значения объема около $1,19 \text{ м}^3$, тогда как остальные две — около $1,3 \text{ м}^3$. Это указывает на низкую консервативность первых двух моделей, т. е. они могут давать неприемлемые результаты на длинных временах.

Распределение значений средней температуры (таблица 5) имеет иную тенденцию. Так, в нестационарных расчетах разница между двумя постановками SST модели минимальна ($0,7^\circ\text{C}$), тогда как разница между SST и вихре-разрешающими моделями составляет несколько градусов. Для стационарного режима характерен разброс значений средней температуры. Минимум ($28,2^\circ\text{C}$) дает модель $k - \omega$, максимум ($58,7^\circ\text{C}$) — гетерогенная RNG $k - \epsilon$.

Отметим, что все расчеты с использованием модели нулевого порядка закономерно завершились с ошибкой. Это полностью соответствует ожиданиям и говорит о косвенной верификации численной модели.

Как видно из таблиц 2–5, с ошибкой завершились двенадцать из двадцати четырех расчетов (не учитываем расчеты с моделью нулевого порядка). Это говорит о низкой устойчивости счета у численной модели, содержащей одновременно свободную поверхность и плотный пузырьковый поток. Такая неустойчивость обусловлена необходимостью вычислять положение свободной поверхности в гетерогенной постановке. Как упоминалось ранее, в гомогенной постановке в ряде численных экспериментов моделируется только турбулентность. Для моделирования течений со свободной поверхностью рекомендуется использовать полную гомогенную постановку². Однако необходимость расчета пузырькового потока исключает использование гомогенного подхода.

² Ansys CFX Tutorials. Release 2024 R2. Canonsburg: Ansys Inc., 2024. 1002 с.

Стационарный режим расчетов оказался устойчивее нестационарного. Это можно объяснить накоплением численных ошибок в нестационарном решении [24]. Данный эффект особенно заметен для многофазных задач, где решается большее число уравнений (кратно количеству фаз). Таким образом, стационарный режим можно рекомендовать для моделирования установившихся режимов, когда зависимость переменных от времени не имеет значения.

Рассматривая поля скоростей, полученные в нестационарном режиме (рис. 3), мы можем обнаружить, что модели DES и LES выводят структуру потока с большим числом вихрей, чем SST. Свободная поверхность жидкости оказалась сильно деформированной в расчетах с моделями DES и SST в гомогенной постановке.

Рассматривая поля скоростей, полученные в стационарном режиме (рис. 4), мы видим, что ни одна из моделей не дает сильной деформации свободной поверхности, даже SST. С применением последней получается картина течения с чуть более сложным рельефом на свободной поверхности. Стоит отметить результат, полученный с помощью модели $k - \omega$. Здесь свободная поверхность наиболее гладкая, а поле скоростей симметричное, что фактически напоминает эталонную картину движения в АПГ [25]. Остальные модели дали схожие между собой результаты как в гомогенной, так и в гетерогенной постановках (рис. 4 а–е, з): двухвихревой поток с преимущественным течением слева направо расчетной области.

Поля скоростей жидкости соответствуют областям, где объемная доля жидкости превышает 85 %. Это позволяет судить о состоянии свободной поверхности. На всех иллюстрациях мы видим одинаково оформленную область газожидкостной струи. Ее дальнобойность практически равна для всех рассматриваемых моделей и режимов вычислений. Диаметр струи на свободной поверхности варьируется незначительно, за исключением тех случаев, когда свободная поверхность оказалась сильно искривленной (рис. 3 а и 3 в). Векторы скорости жидкости направлены по касательной к линиям тока газовой фазы. Это совпадает с ранее полученными результатами исследования гидродинамической ситуации в АПГ [23].

Проанализируем структуру течения в расчетной области. Сама постановка задачи асимметрична: ввод жидкости расположен с правой стороны расчетной области, а выход жидкости и дымовых газов — с левой. Это отражает конструкцию реальных АПГ, где симметричный ввод и вывод рабочих сред нецелесообразен и даже технически невозможен. Следовательно, поле скоростей в ячейке также должно быть асимметричным.

Выше отмечалась зеркальная асимметрия всех полей скоростей, кроме полученного с помощью модели $k - \omega$. Это объясняется несимметричной вихревой структурой потока (три вихря принципиально не могут быть симметричны относительно вертикальной плоскости сечения). Речь идет о применении вихреразрешающих моделей, поэтому рассматриваемая особенность обусловлена входным и выходным течениями, справа и слева соответственно.

Модель SST — это комбинация $k - \omega$ и $k - \epsilon$, и вклад каждой части определяется весовым коэффициентом [26]. Качественное сходство результатов моделирования SST и $k - \epsilon$ объясняется преобладающим весом компоненты $k - \epsilon$.

Модель EARSM использует иную процедуру осреднения Рейнольдсовых напряжений, а значит, может служить эталоном при сравнении моделей класса RANS. Согласно рис. 4з, структура потока, воспроизводимого моделью EARSM, близка к $k - \epsilon$ и SST, что подтверждает достоверность результатов, полученных с их помощью. Можно сделать вывод, что модель $k - \omega$ дает афизичный результат, так как в несимметричной задаче не может быть строгой симметрии поля скоростей.

Ранее отмечалось, что гомогенная модель DES воспроизводит максимальную асимметрию свободной поверхности жидкости. Полученный угол наклона (около 30°) не соответствует реальной гидродинамической ситуации в АПГ, поэтому авторы считают такой результат крайним случаем и полагают нецелесообразным применять гомогенную модель DES.

Говоря о надежности различных моделей, стоит выделить сходство большинства из них как в качественных, так и в количественных результатах. Назовем три крайних случая:

- а) гомогенная $k - \omega$ (симметрия потока, минимальная средняя температура жидкости);
- б) гетерогенная RNG $k - \epsilon$ (максимальная средняя температура жидкости);
- в) гомогенная DES (максимальная деформация свободной поверхности).

Остальные модели в целом равнозначны. Однако для стационарных установившихся режимов рекомендуется применять модель SST. Она продемонстрировала наибольшую устойчивость счета и позволяет разрешать ламинарно-турбулентный переход. Для тех же случаев, когда необходимо рассмотреть динамику процессов, рекомендуется использовать модели LES и гетерогенную SST.

Заключение. Выполнено численное моделирование АПГ с использованием различных способов разрешения турбулентных пульсаций. Итоги численных экспериментов позволяют говорить о сходной картине течения всех моделей турбулентности. Выявлены совпадения по четырем признакам:

- оформленная газожидкостная струя;
- одинаковые дальнобойность и диаметр газожидкостной струи;
- четкая граница свободной поверхности;
- асимметрия поля скоростей (кроме $k - \omega$).

Все модели, кроме гетерогенной RNG $k - \varepsilon$, $k - \omega$ и DES, демонстрируют незначительный разброс таких интегральных параметров, как энергия турбулентных пульсаций, средняя скорость, температура и объем жидкости. Те же модели воспроизводят несимметричность вынужденного потока жидкости в аппарате. Модель $k - \omega$ оказалась нечувствительной к несимметричности, а DES воспроизвела свободную поверхность с углом наклона 30° , что не соответствует гидродинамике АПП.

Численные эксперименты показали невысокую устойчивость счета в задаче с одновременным наличием свободной поверхности и плотного пузырькового потока. Половина расчетов не завершились из-за ошибки решателя. При этом обнаружено, что в стационарном режиме устойчивость счета выше. Это позволяет рекомендовать стационарный режим расчета для тех случаев, когда изменение параметров во времени не представляет интереса. Так бывает, например, при исследовании стационарного режима или если не нужно учитывать накопление Лагранжевых частиц. Кроме того, можно рекомендовать SST при расчетах АПП. Эта модель показала наибольшую устойчивость счета, а также позволяет разрешать ламинарно-турбулентный переход.

Дальнейшие исследования связаны с детальным изучением причин воспроизводства моделями турбулентности таких крайних результатов, как повышенная средняя температура или значительное искривление свободной поверхности.

Список литературы / References

1. Haçat G, Yılmazoğlu M, Çıbık A, El Messoaudi N, Miyah Y, Knani S, et al. Advanced Turbulence Modeling Approaches for Water Treatment Processes: A Comprehensive Review. *Journal of Water Process Engineering*. 2025;80:109102. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2025.109102>
2. Reynolds O. On the Dynamical Theory of Incompressible Viscous Fluids and the Determination of the Criterion. *Philosophical Transactions of the Royal Society*. 1895;186:46–50. URL: <https://archive.org/details/philtrans05206033/mode/2up> (дата обращения: 02.07.2026).
3. Шарфарец Б.П., Дмитриев С.П. Моделирование турбулентного движения жидкости на основе гипотезы Буссинеска. Обзор. *Научное приборостроение*. 2018;28(3):101–107. <https://doi.org/10.18358/np-28-3-i101108>
- Sharfarets BP, Dmitriev SP. Modeling of Turbulent Fluid Motion Based on the Boussinesq Hypothesis. Review. *Nauchnoe priborostroenie*. 2018;28(3):101–107. <https://doi.org/10.18358/np-28-3-i101108>
4. Prandtl L. Über die ausgebildete Turbulenz. *ZAMM*. 1925;5:46–50. URL: https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-662-11836-8_60 (дата обращения: 02.07.2026).
5. Kármán T. Mechanische Ähnlichkeit und Turbulenz. In: *Sonderdrucke aus den Nachrichten von der Gesellschaft der Wissenschaften zu Göttingen. Mathematisch-physische Klasse*. Frankfurt am Main: Weidmannsche Buchhandlung wurde; 1930. 19 p. URL: https://www.researchgate.net/publication/266936962_Mechanische_Ahnlichkeit_und_Turbulenz/stats (дата обращения: 02.07.2026).
6. Spalart PR, Allmaras SR. A One-Equation Turbulence Model for Aerodynamic Flows. *AIAA Paper*. 1992;1:5–21. <https://doi.org/10.2514/6.1992-439>
7. Launder BE, Spalding DB. *Mathematical Models of Turbulence*. London: Academic Press; 1972. 169 p.
8. Wilcox D. Formulation of the $k - \omega$ Turbulence Model Revisited. *AIAA Journal*. 2008;46(11):2823–2838. <https://doi.org/10.2514/1.36541>
9. Durbin PA. Separated Flow Computations with the $k - \varepsilon - v^2$ Model. *AIAA Journal*. 1995;33(4):659–664. <https://doi.org/10.2514/3.12628>
10. Ben Hassan Saïdi I, Schmelzer M, Cinnella P, Grasso F. CFD-Driven Symbolic Identification of Algebraic Reynolds-Stress Models. *Journal of Computational Physics*. 2022;457:111037. <https://doi.org/10.1016/j.jcp.2022.111037>
11. Wenzhi Huang, Yanhui Li, Rundong Zhang, Zhuohang Wu, Min Gao, Yu-Xin Ren. The Intrinsic Filters of the Finite Volume Methods and a New Interpretation of the Implicit Large Eddy Simulation. *Journal of Computational Physics*. 2026;549:114603. <https://doi.org/10.1016/j.jcp.2025.114603>
12. Annapah HF, Kurushina VA. Analysis of the Drag-Reduction Ability of the Layout and Cross-Sectional Shapes of Subsea Structures in the Critical Flow Mode. *Advanced Engineering Research (Rostov-on-Don)*. 2024;24(2):135–147. <https://doi.org/10.23947/2687-1653-2024-24-2-135-147>
13. Menter FR. *Turbulence Modeling for Engineering Flows (a technical paper from Ansys Inc)*. Canonsburg, PA: Ansys; 2011. 25 p. URL: https://cfd.spb.ru/agarbaruk/doc/2011_Menter_Turbulence%20Modeling%20for%20Engineering%20Flows.pdf (дата обращения: 02.07.2026).
14. Костыря А.В. Численное моделирование затопленной газожидкостной струи различной дисперсности. *Вестник Пермского университета. Физика*. 2024;(3):5–12. <https://doi.org/10.17072/1994-3598-2024-3-05-12>

Kostyrya AV. Numerical Modeling of a Submerged Gas-Liquid Jet of Various Dispersity. *Bulletin of Perm University. Physics*. 2024;(3):5–12. <https://doi.org/10.17072/1994-3598-2024-3-05-12>

15. Nana Qi, Kai Zhang, Gang Xu, Yongping Yang, Hu Zhang. CFD-PBE Simulation of Gas-Phase Hydrodynamics in a Gas-Liquid-Solid Combined Loop Reactor. *Petroleum Science*. 2013;10:251–261. <https://doi.org/10.1007/s12182-013-0274-5>

16. Saad N Saleh, Ahmed A Mohammed, Farah K Al-Jubory, Shahzad Barghi. CFD Assessment of Uniform Bubbly Flow in a Bubble Column. *Journal of Petroleum Science and Engineering*. 2018;161:96–107. <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2017.11.002>

17. Островский Г.М., Абиев Р.Ш., Барабаш В.М., Биленко Л.Ф., Богданов В.В., Бритов В.П. *Новый справочник химика и технолога. Процессы и аппараты химических технологий, часть I*. Санкт-Петербург: Профессионал; 2004. 848 с. URL: <https://djvu.online/file/WeiUmY2hTZLdu> (дата обращения: 02.07.2026).

Ostrovsky GM, Abiev RSh, Barabash VM, Bilenko LF, Bogdanov VV, Britov VP. *A New Handbook for Chemists and Technologists. Processes and Equipment for Chemical Engineering*, part I. Saint-Petersburg: Professional; 2004. 848 p. (In Russ.)

18. Peng Li, Xuhui Zhang, Xiaobing Lu. Three-Dimensional Eulerian Modeling of Gas – Liquid – Solid Flow with Gas Hydrate Dissociation in a Vertical Pipe. *Chemical Engineering Science*. 2019;196:145–165. <https://doi.org/10.1016/j.ces.2018.10.053>

19. Yimeng Du, Zhendong Jin, Chengjun Zhang, Yan Cui, Yulong Wang, Rongxuan Hu, et al. A Solver-Agnostic Lagrangian Approach for Efficient Particle Tracking in Unsteady Multiphase Flows. *Computers & Fluids*. 2026;305:106914. <https://doi.org/10.1016/j.compfluid.2025.106914>

20. Mengdie Wang, Chao Ni, Xiangning Bu, Yaoli Peng, Guangyuan Xie, Zhongchao Tan, et al. CFD-PBM Simulation of the Column Flotation Unit of FCMC: Importance of Gas-Liquid Interphase Forces Models. *The Canadian Journal of Chemical Engineering*. 2023;101(10):5925–5940. <https://doi.org/10.1002/cjce.24828>

21. Weiling Li, Wenqi Zhong. CFD Simulation of Hydrodynamics of Gas — Liquid — Solid Three-Phase Bubble Column. *Powder Technology*. 2015;286:766–788. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2015.09.028>

22. Gallier S. Aluminum Combustion in Strong Convective Flows. *Combustion and Flame*. 2023;249:112598. <https://doi.org/10.1016/j.combustflame.2022.112598>

23. Демин В.А., Костыря А.В. Динамика трехфазного потока газ — жидкость — твердые частицы в установке погружного горения. *Известия Санкт-Петербургского государственного технологического института (технического университета)*. 2022;63(89):78–83. <https://doi.org/10.36807/1998-9849-2022-63-89-78-83>

Demin V, Kostyrya A. Dynamics of Gas — Liquid — Solid Three Phase Flow in Submerged Combustion Plant. *Bulletin of the Saint Petersburg State Institute of Technology (Technical University)*. 2022;63(89):78–83. <https://doi.org/10.36807/1998-9849-2022-63-89-78-83>

24. Sadrehaghghi I. *Flow Uncertainty. Quantification within CFD. Verification & Validation*. Annapolis: CFD Open Series; 2025. 103 p. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.26397.03042/7>

25. Алабовский А.Н., Удыма П.Г. *Аппараты погружного горения*. Москва: Издательство МЭИ; 1994. 256 с. URL: <https://www.c-o-k.ru/library/document/12790> (дата обращения: 02.07.2026).

Alabovskiy AN, Udyma PG. *Submerged Combustion Devices*. Moscow: Izdatelstvo MEI; 1994. 256 p. URL: <https://www.c-o-k.ru/library/document/12790> (дата обращения: 02.07.2026).

26. Yang XL, Liu Y, Yang L. A Shear Stress Transport Incorporated Elliptic Blending Turbulence Model Applied to Near-Wall, Separated and Impinging Jet Flows and Heat Transfer. *Computers & Mathematics with Applications*. 2020;79(12):3257–3271. <https://doi.org/10.1016/j.camwa.2020.01.024>

Об авторах:

Виталий Анатольевич Демин, доктор физико-математических наук, заведующий кафедрой «Теоретическая физика» Пермского государственного национального исследовательского университета (614990, Российская Федерация, г. Пермь, ул. Букирева, 15), [SPIN-код](#), [ORCID](#), [ScopusID](#), [ResearcherID](#), demin@psu.ru

Алексей Валерьевич Костыря, аспирант кафедры «Общая физика» Пермского национального исследовательского политехнического университета (614990, Российская Федерация, г. Пермь, Комсомольский пр-т, 29), [SPIN-код](#), [ORCID](#), [ScopusID](#), [ResearcherID](#), [ResearchGate](#), avkostyrja@pstu.ru

Заявленный вклад авторов:

В.А. Демин: научное руководство, написание рукописи – рецензирование и редактирование.

А.В. Костыря: проведение исследования, написание черновика рукописи.

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Декларация ИИ. Авторы заявляют, что при подготовке текста рукописи не использовались технологии генеративного искусственного интеллекта (ИИ), ИИ не является соавтором публикации: авторство присвоено только физическим лицам, внёсшим существенный интеллектуальный вклад в исследование.

About the Authors:

Vitaly A. Demin, Dr.Sci. (Phys.-Math.), Head of the Theoretical Physics Department, Perm State National Research University (15, Bukireva Str., Perm, 614990, Russian Federation), [SPIN-code](#), [ORCID](#), [ScopusID](#), [ResearcherID](#), demin@psu.ru

Aleksey V. Kostyrya, Postgraduate student of the General Physics Department, Perm National Research Polytechnic University (15, Bukireva Str., Perm, 614990, Russian Federation), [SPIN-code](#), [ORCID](#), [ScopusID](#), [ResearcherID](#), [ResearchGate](#), avkostyrja@pstu.ru

Claimed Contributorship:

VA Demin: supervision, writing – review & editing.

AV Kostyrya: investigation, writing – original draft preparation.

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

All authors have read and approved the final manuscript.

AI Declaration. The authors declare that generative artificial intelligence (AI) technologies were not used in the preparation of the manuscript text and that AI is not a co-author of the publication: authorship is assigned only to natural persons who have made a substantial intellectual contribution to the research.

Поступила в редакцию / Received 14.05.2026

Поступила после рецензирования / Reviewed 17.06.2026

Принята к публикации / Accepted 28.06.2026

МЕХАНИКА
MECHANICS

УДК 624.078.4:692.4

Оригинальное эмпирическое исследование

<https://doi.org/10.23947/2687-1653-2026-26-3-2470>

Совершенствование эффективности проектирования, надежности и безопасной эксплуатации бесферменных кровельных систем на основе механического расчета узлов соединения кровли с балочным основанием



EDN: WYHUST

Сачин Балкришна Мулай , Сурья Пракаш

Университет Сандип, Насик, Индия, <https://ror.org/04vhxp922>✉ spsingh.jmd@gmail.com**Аннотация**

Введение. Бесферменные кровельные системы из холодногнутых стальных листов получили широкое распространение в большепролетных промышленных и общественных зданиях. Ветровая нагрузка и сейсмические воздействия предъявляют жесткие требования к узлу соединения кровли с балкой, поскольку именно в этом узле возникают концентрация напряжений, локальные деформации и неравномерное распределение нагрузок в болтах, определяющие работоспособность и долговечность конструкции. Несмотря на то, что локальные механизмы разрушения в зонах креплений, зажимов и швов изучены достаточно глубоко, на сегодняшний день отсутствует проверенная сравнительная методика выбора конфигураций опорных узлов для бесферменных арочных кровельных систем. Цель данной работы — оценить поведение четырех типов узлов соединения кровли с балкой, пригодных для монтажа на строительной площадке (традиционный механический анкер, оголовочная плита, опорный кронштейн и неразрезной стальной каркас) в одинаковых условиях нагружения и на этой основе предложить расчетно-механические принципы выбора соединения.

Материалы и методы. Стальные панели AZ150 Galvalume (толщина 0,8 мм, ширина 600 мм, пролет арки 20 м) с явно выраженной трапециевидальной геометрией гофрирования были экспериментально испытаны в условиях имитации ветровой нагрузки (0,50–2,00 кН/м²). Параллельно выполнено численное моделирование в ANSYS Mechanical с использованием оболочечных элементов SHELL181 с учетом контакта между поверхностями, кулоновского трения и многоточечного ограничения болтов. В качестве варьируемых факторов в двухфакторном плане по методологии поверхности отклика (Design-Expert v13) рассматривались ветровое давление (1,0–2,0 кН/м²) и сейсмическое ускорение (0,10–0,25 g). Результаты моделирования были подтверждены лабораторными измерениями прогиба и напряжений в опорных узлах, а также перекрестно сопоставлены с опубликованными экспериментальными данными других авторов.

Результаты исследования. При переходе от традиционного анкерного узла к неразрезному стальному каркасу прогиб в середине пролета снижался, причем максимальное уменьшение достигло 20 %. Пиковое напряжение по Мизесу в опорном узле уменьшилось на 60,1 %, а нагрузка на один болт в системе с неразрезным каркасом оказалась вдвое меньше, чем при использовании традиционного анкера. ANOVA подтвердил, что давление ветра было единственным статистически значимым фактором ($p < 0,0001$), в то время как сейсмическое ускорение не оказывало заметного влияния на вертикальное отклонение или интенсивность базового напряжения ($p = 1,0000$). Прогнозы КЭА (конечно-элементный анализ) согласуются с экспериментальными измерениями в пределах 6,8 % для прогиба и 7,2 % для базового напряжения.

Обсуждение. Полученные данные показывают, что при эксплуатационных ветровых нагрузках напряженно-деформированное состояние бесферменных кровельных систем определяется жесткостью узла соединения и неразрывностью контакта, а не прочностью листового материала. Улучшение характеристик при переходе от одного типа соединения к другому среди четырех исследованных конфигураций связано с увеличением эффективной площади контакта и переходом от дискретной передачи нагрузки через болты к распределенной передаче через контактные поверхности.

Заключение. В рамках работы разработана и верифицирована методика сравнительной оценки опорных узлов бесферменных кровельных систем на основе конечно-элементного анализа и методологии поверхности отклика. По результатам исследований в качестве предпочтительного соединения для большепролетных бесферменных кровель рекомендован неразрезной стальной каркас, однако для окончательного выбора требуется дополнительная проверка в полевых условиях, в том числе при более высоких уровнях сейсмических воздействий.

Ключевые слова: бесферменные кровли, соединения кровли с балкой, сопротивление ветровой нагрузке, конечно-элементное контактное моделирование, оптимизация поверхности отклика

Благодарности. Авторы выражают искреннюю благодарность преподавателям, техническому персоналу и сотрудникам лаборатории инженерно-технологического факультета университета Сандип, Насик, за ценную помощь в подготовке образцов, настройке эксперимента, проведении испытаний и сборе данных. Авторы также выражают признательность коллегам за конструктивные предложения, высказанные в ходе численного моделирования.

Для цитирования. Сачин Балкришна Мулай, Сурья Пракаш. Совершенствование эффективности проектирования, надежности и безопасной эксплуатации бесферменных кровельных систем на основе механического расчета узлов соединения кровли с балочным основанием. *Advanced Engineering Research (Rostov-on-Don)*. 2026;26(3):2470. <https://doi.org/10.23947/2687-1653-2026-26-3-2470>

Original Empirical Research

Improving Design Efficiency, Reliability, and Safe Operation of Trussless Roofing Systems through Mechanics-Based Evaluation of Roof-to-Beam Base Connections

Sachin Balkrishna Mulay , Surya Prakash 

Sandip University, Nashik, India, <https://ror.org/04vhxp922>

✉ spsingh.jmd@gmail.com

Abstract

Introduction. Trussless roofing systems employing curved cold-formed metal sheets are widely used in long-span industrial and public structures. Wind uplift and seismic excitation impose significant demands on the roof-to-beam base connection, where stress concentrations, local deformations, and bolt force imbalances govern structural performance and serviceability. Although local failure mechanisms at fasteners, clips, and seams have been extensively studied, no verified comparative framework exists for selecting base connection configurations specifically for trussless arched roof systems. The objective of this study is to evaluate the structural behavior of four field-constructible base connection systems — traditional mechanical anchor, cap plate, support bracket, and continuous steel frame — under identical loading conditions and to establish a mechanics-based basis for connection selection.

Materials and Methods. AZ150 Galvalume steel panels (0.8 mm, 600 mm width, 20 m arch span) with explicit trapezoidal corrugation geometry were tested experimentally under simulated wind uplift (0.50–2.00 kN/m²) and modelled numerically using ANSYS Mechanical with SHELL181 shell elements, surface-to-surface contact, Coulomb friction, and multipoint constraint bolt formulations. Wind pressure (1.0–2.0 kN/m²) and seismic acceleration (0.10–0.25 g) were studied as factors in a two-factor response surface methodology design using Design-Expert v13. Model predictions were validated against laboratory deflection and base stress measurements, and cross-validated against independently published experimental data.

Results. Mid-span deflection decreased from the traditional anchor to the continuous frame, with a maximum reduction of 20%. The peak von Mises stress at the base connection was reduced by 60.1%, and per-bolt demand in the continuous frame was halved relative to the traditional anchor. ANOVA confirmed that wind pressure was the sole statistically significant factor ($p < 0.0001$), while seismic acceleration had no detectable effect on vertical deflection or base stress intensity ($p = 1.0000$). FEA predictions agreed with experimental measurements within 6.8% for deflection and 7.2% for base stress.

Discussion. The findings demonstrate that connection stiffness and contact continuity, rather than sheet material strength, govern the stress-strain state of trussless roof systems under service-level wind loading. The improvement across the four configurations is attributable to increased effective contact area and the transition from discrete bolt-dependent to distributed surface-based load transfer.

Conclusion. A validated finite-element and response-surface-based framework has been developed for comparative assessment of trussless roof base connections. The continuous steel frame is recommended as the preferred connection for long-span trussless roofing, subject to further validation under field conditions and across extended seismicity ranges.

Keywords: trussless roofing systems, roof-to-beam base connections, wind uplift resistance, finite-element contact modeling, response surface optimization

Acknowledgments. The authors would like to thank the faculty members, technical staff, and laboratory personnel of the School of Engineering and Technology, Sandip University, Nashik, for their valuable assistance during specimen preparation, experimental setup, testing, and data collection. The authors also acknowledge the support received from colleagues who provided constructive suggestions during the numerical modeling.

For Citation. Sachin Balkrishna Mulay, Surya Prakash. Improving Design Efficiency, Reliability, and Safe Operation of Trussless Roofing Systems through Mechanics-Based Evaluation of Roof-to-Beam Base Connections. *Advanced Engineering Research (Rostov-on-Don)*. 2026;26(3):2470. <https://doi.org/10.23947/2687-1653-2026-26-3-2470>

Введение. Бесферменные кровельные системы из холодногнутых стальных листов находят все более широкое применение в промышленных, складских, транспортных, спортивных и сельскохозяйственных зданиях благодаря малому собственному весу, высокой скорости монтажа, снижению материалоемкости и возможности перекрытия больших пролетов без колонн. По сравнению с традиционными кровлями на ферменном основании, такие системы дают экономические и архитектурные преимущества, а также упрощают изготовление и монтаж [1]. Однако эффективность работы бесферменных кровельных систем во многом зависит от надежности узла соединения кровли с балкой, поскольку именно через этот узел осуществляется передача нагрузки от криволинейного профиля на несущую конструкцию [2].

В последние десятилетия разрушения легких металлических кровельных систем при экстремальных ветровых нагрузках привлекли значительное внимание в практике строительной механики. Давление ветровой нагрузки может вызывать локальные концентрации напряжений, вырывание болтов, расслоение швов, чрезмерную деформацию и прогрессирующее разрушение соединений, особенно вблизи опорных зон, где напряжения достигают максимальных значений [3]. В сейсмически активных регионах повторяющиеся циклические нагрузки могут еще больше усугубить локальную нестабильность и износ соединений. Поскольку бесферменные кровли опираются преимущественно на тонкие гофрированные листы и дискретные крепежные системы, поведение узла сопряжения становится ключевым фактором, влияющим на безопасность конструкции, эксплуатационные характеристики и срок службы конструкции [4].

В предыдущих исследованиях подробно рассматривалось структурное поведение кровельных систем из холодногнутой стали, включая характеристики швов, сопротивление выдергиванию крепежных элементов, локальный изгиб и реакцию на ветровую нагрузку [5]. Локальные геометрические разрывы, такие как отверстия для болтов и кромки опор, могут создавать концентрированные поля напряжений в пластинчатых конструктивных элементах, что требует локальной оценки напряжений [6]. Исследователи изучали влияние расположения болтов, конфигурации зажимов, толщины листа и геометрии гофрирования на несущую способность кровельных конструкций [7]. Экспериментальные и численные исследования показали, что жесткость соединения и характер контакта в значительной мере определяют распределение напряжений и деформаций в тонкостенных кровельных системах [8]. Более поздние исследования, опубликованные в период с 2020 по 2025 год, были сосредоточены на конечно-элементном моделировании легких кровельных конструкций, оптимизации систем крепления и вероятностной оценке ветроустойчивости [9]. Недавние исследования, представленные в таблице 1, основаны на полномасштабных испытаниях под давлением, нелинейном конечно-элементном моделировании, эквивалентных пружинных моделях и параметрических симуляциях.

Таблица 1

Обобщение результатов экспериментальных, численных и аналитических исследований узлов крепления металлических кровель и облицовочных систем, подверженных ветровой нагрузке

Ссылка / цитируемый источник	Цель / задача	Методология / подход	Изученные материалы / параметры	Основные выводы / результаты	Актуальность для данного исследования
[10]	Анализ стадий разрушения кровли при ветровых нагрузках	Квазидинамические испытания, конечно-элементное моделирование	Система фальцевой кровли	Δ Выявлен трехступенчатый механизм отказа	Поддерживает поэтапную оценку соединения
[11]	Количественная оценка уязвимости к ветру	Численный анализ надежности	Индекс повреждения, уровни производительности	Δ Получены многоступенчатые кривые уязвимости	Устанавливает связь между состояниями повреждений и проектными критериями

[12]	Увеличение несущей способности скользящей опоры	Тестирование и численный анализ	Скользящая опора, прочность на растяжение	Δ Скользящее смещение - выше в 2,0–3,24 раза	Показывает значимость геометрии опорных узлов
[13]	Укрепление замковых кровельных соединений	Детальное конечно-элементное моделирование	Скользящая опора, сэндвич-панель	Δ Несущая способность в 3,24 раза выше, чем у базового уровня	Демонстрирует эффект усиления связи
[14]	Испытание устойчивости к отрыву замковой облицовки	Испытания под давлением, нелинейный конечно-элементный анализ	Толщина, предел текучести, пролет	∇ Повреждение винтовой части соединения	Подтверждает локальное повреждение крепежного элемента
[15]	Испытание на прочность при отрыве обшивочных досок	24 испытания, 264 конечно-элементные модели	Облицовка из холодногнутой стали толщиной 0,48–0,55 мм	∇ Локальный обрыв зажима вблизи саморезов	Подтверждает уязвимость зоны соединения
[16]	Моделирование протяжки гофрированной облицовки	Проверенное параметрическое исследование в Abaqus	Геометрия, толщина, шайба, пролет	∇ Пластическое смятие в местах крепления винтов	Поддерживает концентрацию напряжения в болтовом отверстии
[17]	Моделирование модернизированных металлических кровель	Высокоточная проверка методом конечных элементов	ТРО-мембрана, расстояние между крепежными элементами	Δ Зафиксировано поле деформации от ветровой нагрузки	Поддерживает проверенное конечно-элементное моделирование кровли
[18]	Оценка усталости сварных кровельных конструкций	Эксперименты на усталость при растяжении	L-образные опоры из нержавеющей стали SUS304	Δ Установлен безопасный диапазон циклических нагрузок	Обеспечивает устойчивость к циклическим нагрузкам
[19]	Сравнение ветроустойчивости кровельных систем	Испытания на ветровую нагрузку, моделирование методом конечных элементов	Системы из сплавов Al-Mg-Mn и нержавеющей стали	Δ Система непрерывной сварки на 25 % прочнее	Поддерживает преимущество непрерывного соединения

Все эти исследования сходятся на том, что разрушение кровли происходит не из-за равномерной пластической деформации листового материала, а из-за поведения узлов соединений: смещения шва, вырывания зажимов, прорыва винтов или отсоединения опоры. Ключевое техническое различие между этими исследованиями заключается в обрабатываемом интерфейсе: прорыв винтов в гофрированной облицовке, вырывание зажимов из шва в системах с фальцевым соединением, прочность скользящей опоры в кровлях с замковым соединением и взаимодействие мембраны с крепежными элементами в модернизированных кровлях. Давление ветра неизменно оказывается доминирующим параметром нагрузки, в то время как сейсмические воздействия на вертикальную реакцию кровли остаются недостаточно изученными. В основе расчета жесткости элементов и передачи нагрузок в конструктивных системах лежат матрицы жесткости конечных элементов и соответствующие им векторы узловых сил [20].

Криволинейные бесферменные кровельные системы ведут себя в основном как тонкостенные оболочечные конструкции, в которых приложенные нагрузки передаются посредством комбинированных мембранных и изгибных воздействий. В исследованиях были разработаны математические формулы для мембранной теории выпуклых оболочек, обеспечивающие теоретическую основу для оценки структурного отклика криволинейных кровельных профилей под воздействием внешней нагрузки [21]. Однако характеристики этих кровельных систем могут определяться локальными эффектами в местах соединения кровли с балкой, а не равномерной прочностью кровельного листа. Другие исследователи изучали оценку напряжений в пластинах, содержащих концентраторы напряжений, демонстрируя важность оценки локализованных полей напряжений вокруг геометрических разрывов [6]. Аналогичным образом исследователи изучали возникновение разрушений, вызванных концентраторами

напряжений в сварных соединениях и конструктивных элементах, подчеркивая потенциальную уязвимость сварных участков, отверстий для болтов и опорных интерфейсов [22]. Тонкие кровельные листы также могут испытывать локальную нестабильность при недостаточном ограничении соединения и распределении нагрузки. В этом отношении исследователи проанализировали поведение прямоугольных пластин при потере устойчивости, предоставив полезные теоретические сведения об устойчивости тонкостенных конструктивных элементов. В рамках другого исследования были разработаны точные и приближенные матрицы жесткости и векторы узловых сил для конечных элементов с различной жесткостью [20]. Это подтверждает, что правильный выбор формулировок для матрицы жесткости и вектора нагрузок играет ключевую роль в численном анализе конструкций. Таким образом, для надежного прогнозирования деформаций и напряжений в бесферменных кровельных системах необходимы конечно-элементные модели, учитывающие характеристики жесткости, узловые нагрузки, контактное поведение и реалистичные условия соединения.

Несмотря на эти изменения, имеющаяся литература по-прежнему в значительной степени сосредоточена на поведении локальных крепежных элементов или отдельных компонентов соединения, а не на сравнительной оценке структурных характеристик полных систем соединения кровли с балками, используемых в бесферменных арочных кровлях. Существующие исследования, как правило, оценивают отдельные детали, такие как зажимы, анкера или швы, при определенных условиях нагрузки, в то время как систематическое сравнение альтернативных конфигураций соединений, которые можно выполнить на месте при одинаковых ветровых и сейсмических воздействиях, до сих пор отсутствует. Кроме того, ограниченное количество исследований посвящено тому, как различные схемы соединений влияют на общую деформацию кровли, перераспределение напряжений и баланс усилий болтов в бесферменных кровельных системах с большими пролетами. Таким образом, существует явный научный пробел в отношении выбора эффективных и надежных систем соединения основания для бесферменных кровель на основе механических принципов.

Цель данного исследования — провести сравнительную структурную оценку различных систем соединения кровли с балочным основанием для большепролетных бесферменных кровельных конструкций при комбинированных нагрузках окружающей среды. В частности, в исследовании оцениваются структурное поведение и эффективность четырех распространенных конфигураций соединений: традиционный механический анкер, оголовочная плита, опорный кронштейн и неразрезной стальной каркас.

Для достижения этой цели были поставлены следующие исследовательские задачи.

1. Экспериментальное исследование деформационного и напряженного поведения образцов бесферменной кровли, подверженных ветровой нагрузке.
2. Разработка конечно-элементных моделей, способных моделировать механический отклик различных систем соединения оснований.
3. Сравнение влияния конфигурации соединения на прогиб, концентрацию напряжений и распределение усилий в болтах.
4. Оценка влияния давления ветра и сейсмического ускорения на реакцию конструкции.
5. Валидация численных прогнозов с помощью экспериментальных измерений и сравнительного статистического анализа.
6. Определение наиболее эффективной системы соединений, позволяющей повысить безопасность и надежность бесферменных кровельных конструкций.

Ожидается, что результаты данного исследования внесут вклад в разработку рациональных рекомендаций по проектированию бесферменных кровельных соединений и будут способствовать более безопасному и эффективному применению легких кровельных систем большой протяженности в инженерной практике.

Материалы и методы

Материалы и конфигурация кровельной системы

Исследуемая кровельная система состояла из криволинейных холодногнутых листов стали Galvalume, используемой для кровельных конструкций с бесферменными пролетами. Листы были изготовлены из стали AZ150 с алюминиево-цинковым покрытием номинальной толщиной 0,8 мм и эффективной шириной 600 мм. Кровельные листы были сформированы в виде изогнутой арки с пролетом 20 м. Для повышения изгибной жесткости и улучшения внеплоскостной устойчивости при ветровой нагрузке был использован трапецевидный профиль гофра. Общая геометрия исследуемой кровельной системы показана на рис. 1, а основные геометрические параметры приведены в таблице 2.

Таблица 2

Геометрические характеристики кровельной системы

Параметр	Значение
Пролет крыши	20 м
Эффективная ширина листа	600 мм
Толщина листа	0,8 мм
Тип покрытия	AZ150 Galvalume
Профиль кровли	Трапецеидальный гофр
Структурная форма	Криволинейная бесферменная арка

Кровельные листы были изготовлены с использованием портативного профилирующего станка модели KR-18 (Knudson Manufacturing Inc., США), а механическая сварка листов осуществлялась с помощью портативного механического обжимного устройства модели LC-200 (LYSAGHT®, BlueScope Steel Ltd., Австралия). Опорные балки были изготовлены из обычных профилей конструкционной стали, используемых в промышленных кровельных системах. Механические свойства стали Galvalume, использованной в экспериментальных и численных исследованиях, представлены в таблице 3.

Таблица 3

Механические свойства стали Galvalume

Свойство	Значение
Модуль упругости	200 ГПа
Коэффициент Пуассона	0,30
Предел текучести	345 МПа
Предел прочности на растяжение	480 МПа
Плотность	7850 кг/м ³

Эти характеристики были взяты из данных производителя и верифицированы, где это применимо, испытаниями на растяжение образцов.

В данном исследовании были изучены четыре конфигурации соединения основания кровли с балкой:

- традиционное механическое анкерное соединение;
- соединение с оголовком;
- соединение с опорным кронштейном;
- соединение с неразрезным стальным каркасом.



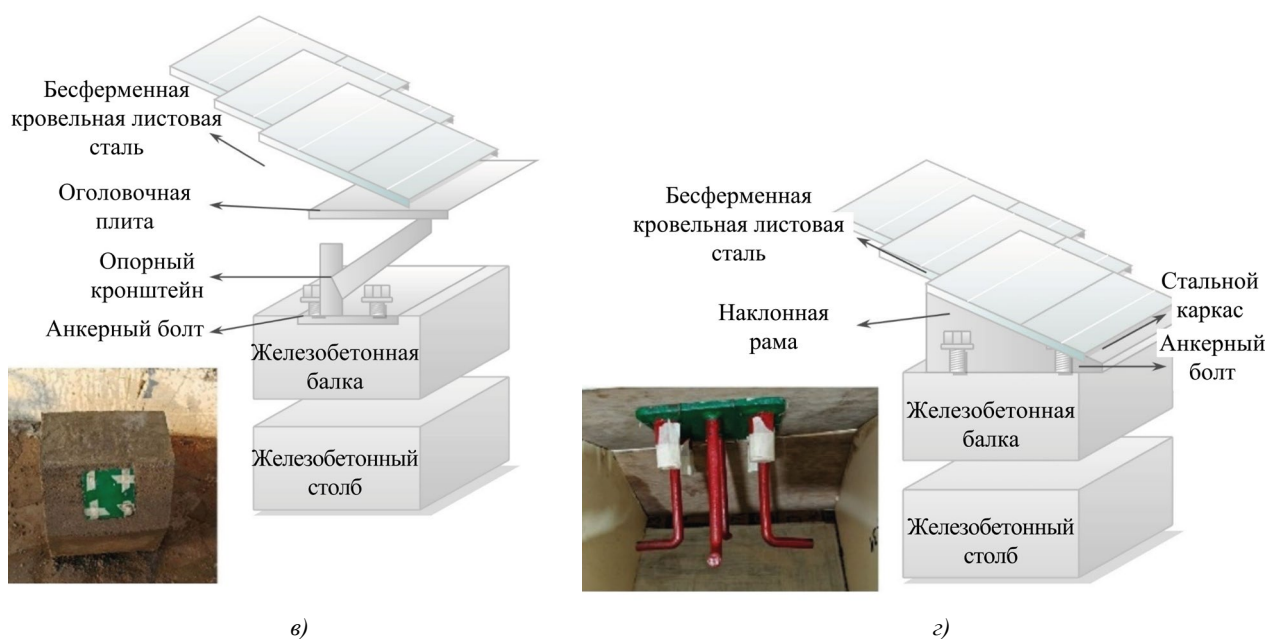


Рис. 1. Геометрия и основные размеры исследуемой бесферменной кровельной системы: *а* — традиционный механический анкер; *б* — соединение с оголовочной плитой; *в* — соединение с опорным кронштейном; *з* — соединение с неразрезным стальным каркасом

Общая геометрия исследуемой кровельной системы показана на рис. 1, а основные геометрические параметры приведены в таблице 2.

На рис. 1 *а* показан традиционный механический анкер, который фиксирует лист с помощью отдельных болтовых точек. На рис. 1 *б* изображено соединение с оголовком, которое распределяет нагрузку по промежуточной опорной поверхности. На рис. 1 *в* представлено соединение с опорным кронштейном, которое обеспечивает наклонную фиксацию и двухплоскостной контакт. На рис. 1 *з* изображено соединение с неразрезным стальным каркасом, где реакция передается по всей длине зоны контакта.



Рис. 2. Изготовление на месте гофрированных листов из гальванизированной стали Galvalume: *а* — процесс мобильной формовки и фальцевания; *б* — готовые гофрированные бесферменные кровельные панели

На рис. 2 представлен процесс изготовления криволинейных гофрированных стальных листов, используемых в бесферменной кровельной системе. На фотографии слева показано портативное механическое оборудование для профилирования и сшивания, работающее с листом стали Galvalume. В ходе этого процесса плоский лист постепенно формируется в трапециевидный гофрированный профиль, что повышает его изгибную жесткость и сопротивление внеплоскостной деформации. На фотографии справа представлены готовые криволинейные кровельные панели после процесса формования. Эти панели обладают необходимой арочной кривизной и геометрией гофрирования для строительства большепролетной бесферменной кровли. Непрерывный криволинейный профиль позволяет кровле передавать приложенные ветровые и гравитационные нагрузки преимущественно за счет арочного эффекта, а гофрирование улучшает локальную устойчивость и снижает риск деформации листов. Процесс изготовления также позволяет производить кровельные листы непосредственно на строительной площадке, что снижает транспортные трудности и упрощает монтаж. В статье в качестве используемого оборудования указывается портативный профилировочный станок КР-18 и механическое обжимное устройство LC-200.

Программа экспериментальных испытаний

В целях определения деформации и реакции на напряжение образцов бесферменной кровли при моделируемой ветровой нагрузке были проведены экспериментальные испытания. Экспериментальная установка показана на рис. 3. Ветровое давление создавалось с использованием сервогидравлической системы нагружения, включающей гидравлический силовой агрегат Enerpac серии ZE (Enerpac Tool Group, США) и совместимый гидравлический привод.

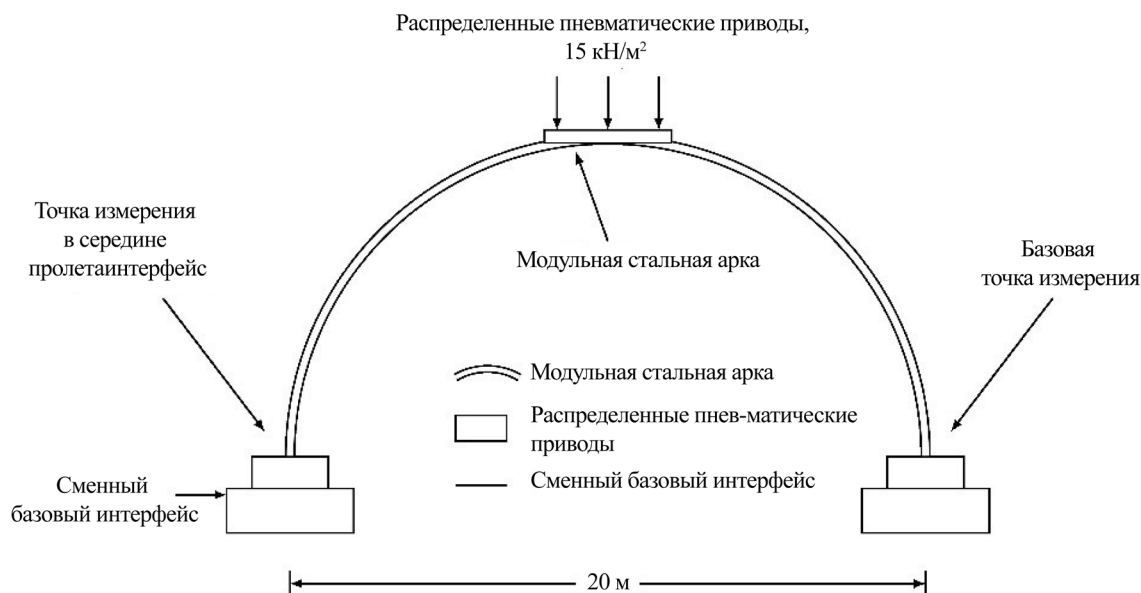


Рис. 3. Экспериментальная установка для моделирования испытаний на ветровую нагрузку образца бесферменной кровли

Приложенное давление контролировалось с помощью калиброванных цифровых датчиков давления с точностью $\pm 0,25\%$ от полной шкалы. Смещение в середине пролета измерялось с помощью линейных дифференциальных трансформаторов, а развитие деформации вблизи зоны соединения кровли с балкой регистрировалось с помощью тензометрических датчиков электрического сопротивления. Схема расположения измерительных приборов была одинаковой для всех образцов в целях обеспечения сопоставимости между четырьмя системами соединения.

Приложенное ветровое давление варьировалось от 0,50 до 2,00 кН/м². Нагрузка прикладывалась постепенно, и показания регистрировались после стабилизации на каждом этапе нагружения. Давление, действующее на поверхность кровли, рассчитывалось с помощью уравнения (1):

$$p = \frac{F}{A}, \quad (1)$$

где p — приложенное давление; F — общая приложенная гидравлическая сила; A — эффективная площадь нагруженной поверхности.

Основными параметрами экспериментальной реакции были:

- прогиб в середине пролета;
- локальная деформация вблизи соединения основания;
- развитие напряжений в области соединения;
- видимая локальная деформация вблизи крепежных элементов и зон опоры.

Список измерительного оборудования, использованного в экспериментальной программе, приведен в таблице 4.

Таблица 4

Экспериментальное оборудование и приборы

Оборудование	Марка / модель	Производитель / страна	Точность / спецификация
Прокатно-профилирующий станок	KR-18	Knudson Manufacturing Inc., США	Переносной полевой модуль
Механическое обжимное устройство	LC-200	LYSAGHT®, BlueScope Steel Ltd., Австралия	Портативное механическое фальцовочное устройство
Гидравлическая система нагрузки	Серия ZE	Enerpac Tool Group, США	Гидравлический блок с серво-управлением

Датчик давления	Цифровой датчик давления	Калиброванный лабораторный датчик	$\pm 0,25$ % от полной шкалы
Датчик перемещения	LVDT (линейно регулируемый дифференциальный трансформатор)	Калиброванный лабораторный датчик	$\pm 0,01$ мм
Тензометрический датчик	Тип электрического сопротивления	Калиброванный лабораторный измерительный прибор	± 1 $\mu\epsilon$

Конечно-элементное моделирование

Численное моделирование проводилось с использованием ANSYS Mechanical для имитации структурной реакции бесферменной кровельной системы и ее базовых соединений. Конечно-элементная модель показана на рис. 4. Кровельные листы и соединительные элементы были смоделированы с использованием оболочечных элементов SHELL181, которые позволяют корректно описывать поведение тонкостенных стальных конструкций при изгибе, мембранном воздействии и геометрической нелинейности.

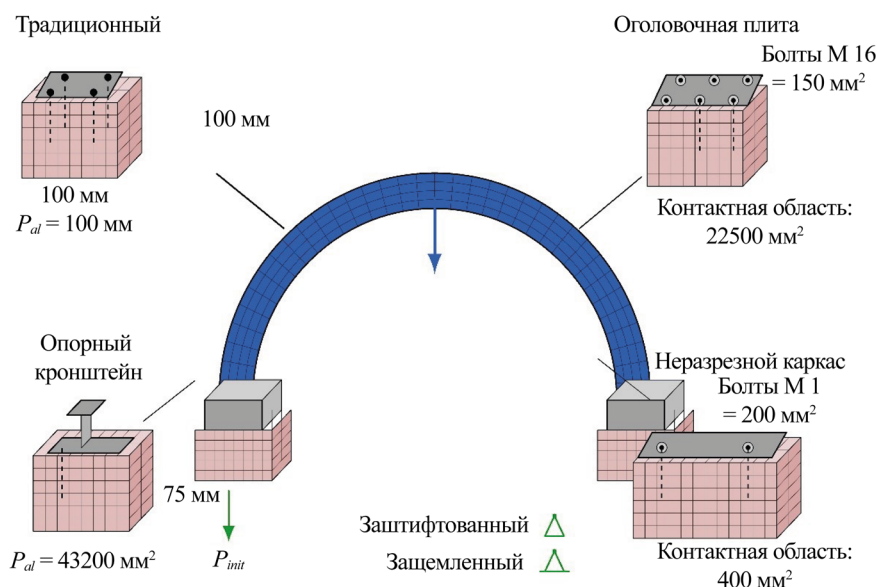


Рис. 4. Конечно-элементная модель бесферменной кровельной системы, показывающая сетку, граничные условия, области контакта и приложенную нагрузку

Контакт между поверхностями был определен как взаимодействие кровельного листа, соединительных элементов и опорных конструкций. Поведение контакта моделировалось с использованием кулоновского трения. Действия болтов и крепежных элементов были представлены с помощью многоточечных ограничений для моделирования передачи нагрузки между соединенными частями.

В отличие от предыдущей модели, в которой не учитывалась пластичность, скорректированная численная модель включала упругопластическое поведение материала для стали Galvalume. Это изменение было необходимо, поскольку локальная текучесть может возникать вблизи зон крепления, опорных областей и зон концентрации напряжений, когда тонкие стальные листы подвергаются воздействию ветрового давления до $2,00 \text{ кН/м}^2$. Поэтому упругопластическая модель использовалась для более реалистичного представления поведения соединения и во избежание недооценки локальной деформации.

Задача равновесия конечных элементов была решена с использованием общей нелинейной статической формулировки, выраженной в уравнении (2):

$$K(u)u = F, \quad (2)$$

где $K(u)$ — глобальная матрица жесткости, зависящая от перемещения; u — вектор перемещений узлов; F — вектор приложенной внешней нагрузки.

Для оценки концентрации напряжений в области соединения кровли и балки использовалось эквивалентное напряжение по Мизесу, которое рассчитывалось с помощью уравнения (3):

$$\sigma_v = \sqrt{\frac{1}{2}[(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2]}, \quad (3)$$

где σ_v — эквивалентные напряжения по Мизесу; σ_1 , σ_2 и σ_3 — главные напряжения.

Ветровое давление прикладывалось перпендикулярно поверхности кровли. Сейсмическое воздействие представляло собой эквивалентную горизонтальную ускоренную нагрузку. Граничные условия численной модели были определены для воспроизведения условий поддержки и ограничения, используемых в экспериментальной программе.

Основные параметры численного моделирования приведены в таблице 5.

Таблица 5

Параметры численного моделирования

Параметр	Описание
программное обеспечение	ANSYS Mechanical
тип элемента	SHELL181
формула контакта	контакт поверхности с поверхностью
модель трения	кулоновское трение
представление болтов	формулировка многоточечных ограничений
модель материала	упругопластическая модель стали
нелинейность	геометрическая и материальная нелинейность
ветровая нагрузка	давление, перпендикулярное поверхности крыши
сейсмическая нагрузка	эквивалентное горизонтальное ускорение
граничные условия	соответствуют экспериментальным условиям поддержки

Сходимость сетки и проверка модели

Для обеспечения численной точности и вычислительной стабильности был проведен тест на сходимость сетки. Тестирование сходимости сетки показало, что оптимальным является размер элемента 8 мм, что соответствует приблизительно 18 640 элементам, поскольку дальнейшее измельчение сетки изменило расчетный результат менее чем на 2 %.

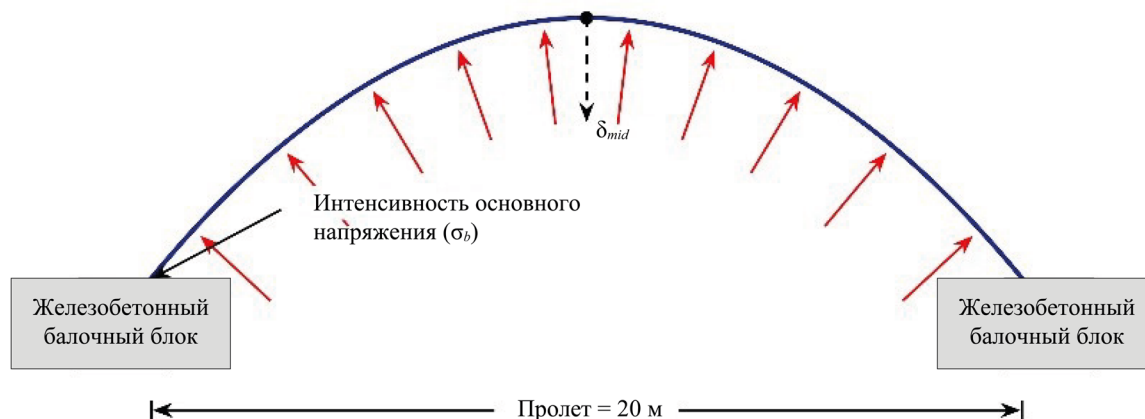
Численная модель была проверена путем сравнения результатов конечно-элементного моделирования с экспериментальными измерениями, полученными в данном исследовании. Сравнение проводилось для прогиба в середине пролета и максимального напряжения в области соединения. Процентное различие между экспериментальными и численными значениями рассчитывалось с помощью уравнения (4):

$$\text{ошибка (\%)} = \frac{|X_{exp} - X_{num}|}{X_{exp}} \times 100, \quad (4)$$

где X_{exp} — экспериментально измеренное значение; X_{num} — численный прогноз.

Помимо внутренней проверки, численная модель была перекрестно проверена с использованием предыдущих исследований поведения холодногнутой стальной кровли и соединений для верификации предположений о контакте, граничных условий, перераспределения нагрузки и характера деформаций. Исследователи [23] особо отметили влияние неоднородности материала и температурных градиентов по толщине на напряжения и прогибы в многослойных ограждающих конструкциях. В другом исследовании [24] подчеркнуто, что эксплуатационные характеристики и долговечность здания зависят от комплексных технических решений.

Давление ветра по нормали к поверхности крыши
 $q_w = 1,0 - 2,0 \text{ кН/м}^2$
 (базовый вариант: $q_w = 1,5 \text{ кН/м}^2$)



a)

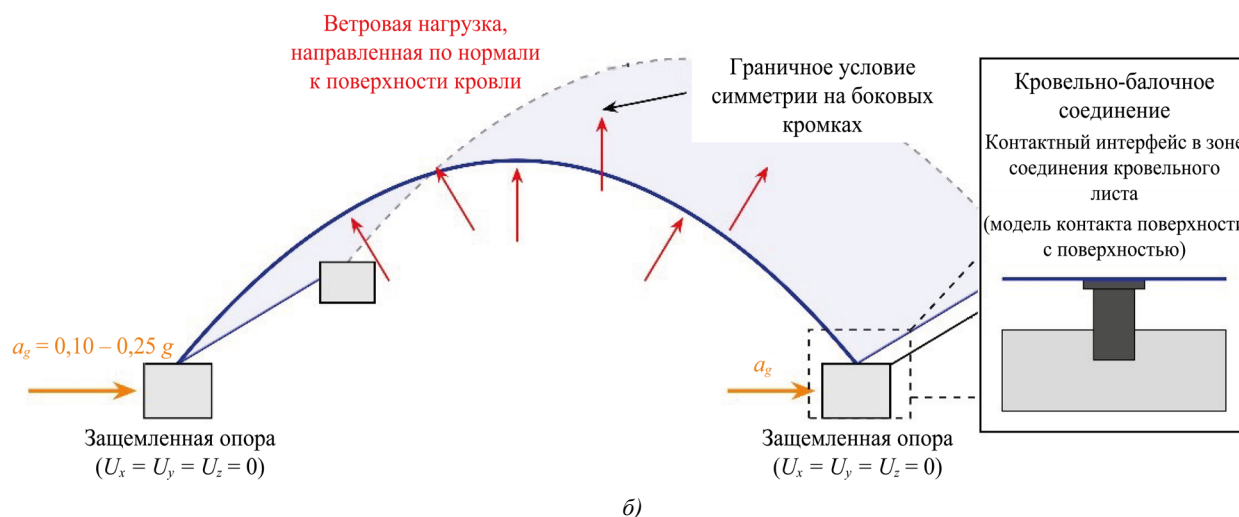


Рис. 5. Процедура сходимости и проверки сетки, принятая для конечно-элементной модели: а — общая схема нагрузки 20-метровой бесферменной крыши при равномерно распределенном давлении ветра; б — конечно-элементная идеализация с отображением опорных закреплений, условий симметрии и сейсмического возбуждения по основанию

Методология поверхности отклика и статистический анализ

Методология поверхности отклика использовалась для оценки влияния ветрового давления и сейсмического ускорения на структурный отклик бесферменной кровельной системы. Статистический анализ проводился с использованием программы Design-Expert v13, Stat-Ease Inc., США.

Были рассмотрены две независимые переменные:

- давление ветра, A ;
- сейсмическое ускорение, B .

Выбранные диапазоны вариаций приведены в таблице 6. В статистическом анализе рассматривались следующие переменные отклика:

- прогиб в середине пролета;
- максимальное напряжение по Мизесу в месте соединения основания.

Таблица 6

Независимые переменные и уровни факторов, используемые в методе поверхности отклика

Фактор	Символ	Нижний уровень	Верхний уровень
Давление ветра	A	1,0 кН/м ²	2,0 кН/м ²
Сейсмическое ускорение	B	0,10 g	0,25 g

Обобщенная модель поверхности отклика второго порядка, используемая в анализе, представлена в уравнении (5):

$$Y = \beta_0 + \sum_{i=1}^n \beta_i X_i + \sum_{i=1}^n \beta_{ii} X_i^2 + \sum_{i < j}^n \beta_{ij} X_i X_j, \quad (5)$$

где Y — прогнозируемый ответ; β_0 — точка пересечения; β_i — линейные коэффициенты; β_{ii} — квадратичные коэффициенты; β_{ij} — коэффициенты взаимодействия; X_i и X_j — независимые входные переменные.

Дисперсионный анализ использовался только для определения статистической значимости выбранных факторов и эффектов их взаимодействия. Подробные коэффициенты регрессии, уровни значимости, уравнения отклика и интерпретация влияния факторов представлены в разделах «Результаты исследования» и «Обсуждение».

Сравнительная оценка систем соединений

Все четыре типа соединений, приведенные на рис. 2, были оценены при одинаковых свойствах материалов, геометрии, граничных условиях и диапазонах нагрузок. Сравнительная оценка основывалась на следующих показателях эффективности:

- прогиб в середине пролета;
- максимальное напряжение по Мизесу в месте соединения кровли с балкой;
- концентрация напряжений вблизи крепежных элементов и опорных зон;
- распределение усилия болта;
- жесткость соединения;
- эффективность передачи нагрузки.

Результаты исследования

Прогиб в середине пролета под ветровой нагрузкой

Реакция на прогиб в середине пролета бесферменной кровельной системы была оценена для всех четырех конфигураций соединений основания при эталонном давлении ветра $1,5 \text{ кН/м}^2$. Сравнительные значения прогиба представлены на рис. 6. Традиционное механическое анкерное соединение вызвало наибольший прогиб в середине пролета — $10,0 \text{ мм}$. Соединение с оголовком уменьшило прогиб до $9,0 \text{ мм}$, что соответствует уменьшению на $10,0 \%$ по сравнению с традиционным анкером. Соединение опорного кронштейна привело к прогибу $8,5 \text{ мм}$, что соответствует уменьшению на $15,0 \%$. Соединение неразрезного стального каркаса привело к наименьшему прогибу в $8,0 \text{ мм}$, что соответствует уменьшению на $20,0 \%$ по сравнению с традиционной анкерной системой.

Значения прогиба монотонно уменьшались по мере перехода системы соединения от дискретного точечного анкерования к непрерывному граничному ограничению. Общий диапазон отклика для четырех систем составил $8,0\text{--}10,0 \text{ мм}$ при заданных условиях нагрузки. При более низком ветровом давлении ($0,50\text{--}1,00 \text{ кН/м}^2$) разница в прогибе между типами соединений была меньше в абсолютном выражении, но сохраняла тот же порядок ранжирования. При максимальном испытанном давлении $2,00 \text{ кН/м}^2$ прогиб неразрезного каркаса составил приблизительно $10,7 \text{ мм}$, в то время как традиционный анкер достиг приблизительно $13,3 \text{ мм}$.

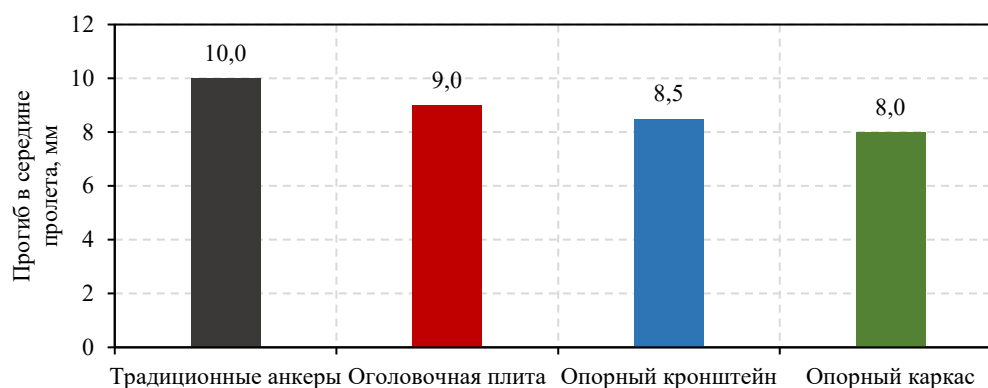


Рис. 6. Сравнение прогибов в середине пролета для различных узлов сопряжения бесферменной кровли под равномерным ветровым давлением $1,5 \text{ кН/м}^2$

Интенсивность напряжений в основании и распределение нагрузки

Интенсивность напряжений в основании арки оценивалась для каждой системы соединения при имитации вертикальной нагрузки 10 кН на метр длины. Результаты представлены на рис. 7. Традиционное анкерное соединение с эффективной площадью контакта $0,2 \text{ м}^2$ показало самую высокую интенсивность напряжений в основании — $50,0 \text{ кН/м}^2$. Соединение с помощью пластины с площадью контакта $0,4 \text{ м}^2$ снизило напряжение в основании до $25,0 \text{ кН/м}^2$, что составляет снижение на $50,0 \%$. Соединение с помощью опорного кронштейна с площадью контакта $0,7 \text{ м}^2$ дополнительно снизило напряжение до $14,3 \text{ кН/м}^2$, что соответствует снижению на $71,4 \%$. Соединение с помощью неразрезного стального каркаса, использующее всю контактную поверхность площадью $1,0 \text{ м}^2$, обеспечило самую низкую интенсивность напряжений — $10,0 \text{ кН/м}^2$, что составляет снижение на $80,0 \%$ по сравнению с традиционным анкером.

Обратная зависимость между площадью контакта и интенсивностью напряжений соответствовала ожидаемой зависимости давления от площади. По мере увеличения эффективной площади контакта от $0,2 \text{ м}^2$ до $1,0 \text{ м}^2$ интенсивность напряжений в основании пропорционально уменьшалась, что подтверждает, что геометрия контактного соединения напрямую контролирует распределение напряжений на границе кровли и балки.

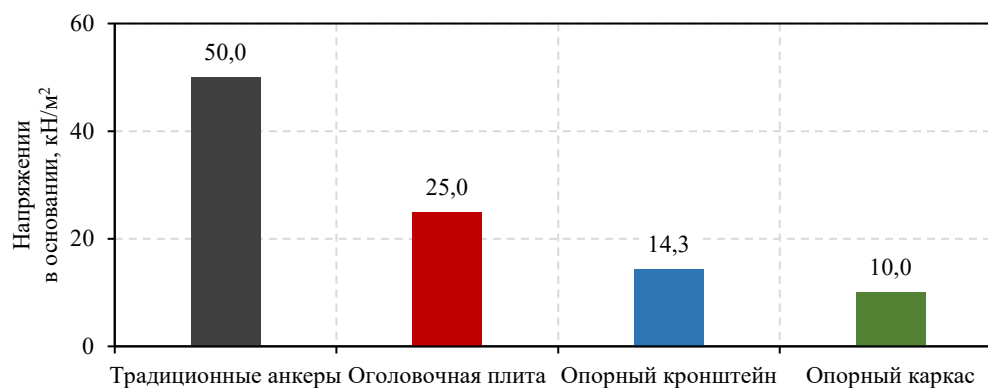


Рис. 7. Распределение нагрузки и интенсивность напряжений в основании арки для каждой конфигурации соединения

Напряженно-деформированное состояние в зоне соединения основания

Для каждой системы соединения были определены пиковое напряжение по Мизесу и соответствующая упругая деформация в зоне соединения основания при эталонном ветровом давлении $1,5 \text{ кН/м}^2$. Результаты расчета напряженно-деформированного состояния и деформаций сведены в таблицу 7.

Таблица 7

Напряженно-деформированное состояние бесферменной кровельной системы под ветровым давлением $1,5 \text{ кН/м}^2$

Система соединения	Пиковое напряжение по Мизесу, МПа	Упругая деформация ($\times 10^{-3}$)	Прогиб в середине пролета, мм
Традиционный анкер	187,4	0,937	10,0
Оголовочная плита	148,2	0,741	9,0
Опорный кронштейн	112,6	0,563	8,5
Неразрезной каркас	74,8	0,374	8,0

Все пиковые значения напряжений оставались ниже предела текучести соответствующих соединительных материалов (240–350 МПа), что подтверждает сохранение структурной реакции в пределах упругого диапазона при заданных условиях нагружения. Упругие деформации рассчитывались из отношения σ/E , используя $E = 200 \text{ ГПа}$.

На рис. 8 представлены пиковые значения напряжения по Мизесу для четырех систем соединения. Традиционный анкер зафиксировал максимальное напряжение 187,4 МПа. Оголовочная плита снизила пиковое напряжение до 148,2 МПа, что соответствует снижению на 20,9 %. Опорный кронштейн дополнительно снизил напряжение до 112,6 МПа, что представляет собой снижение на 39,9 %. Неразрезной стальной каркас обеспечил минимальное пиковое напряжение 74,8 МПа, что соответствует снижению на 60,1 % по сравнению с традиционным анкером.

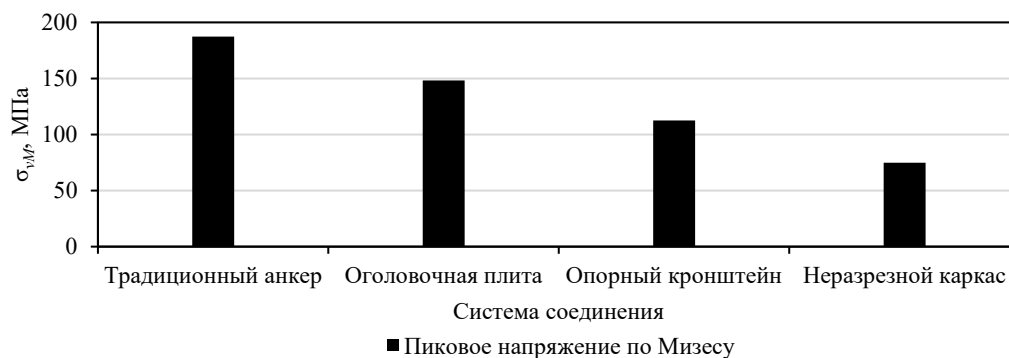


Рис. 8. Пиковое напряжение по Мизесу в зоне соединения основания бесферменной кровельной системы под ветровым давлением $1,5 \text{ кН/м}^2$

На рис. 9 показана упругая деформация в зоне соединения основания для каждой системы. Традиционный анкер показал максимальную деформацию $0,937 \times 10^{-3}$. Оголовочная плита снизила деформацию до $0,741 \times 10^{-3}$ (снижение на 20,9 %). Опорный кронштейн снизил значение до $0,563 \times 10^{-3}$ (снижение на 39,9 %). Неразрезной каркас зафиксировал минимальную деформацию $0,374 \times 10^{-3}$ (снижение на 60,1 %).

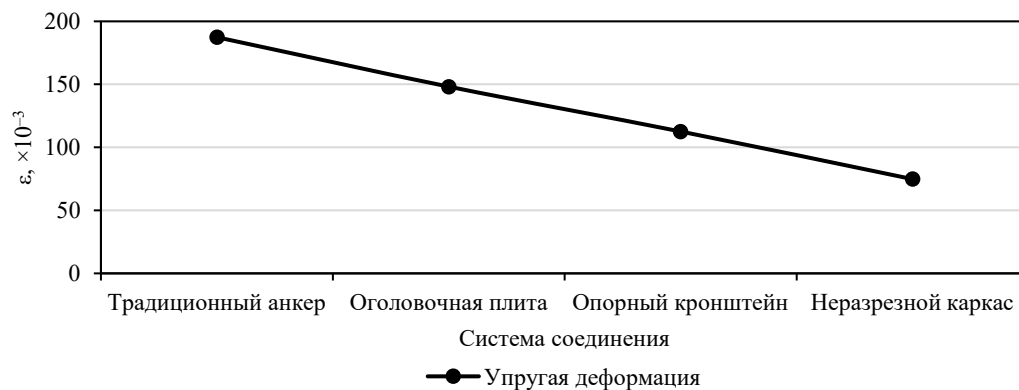


Рис. 9. Упругая деформация в зоне соединения основания бесферменной кровельной системы под ветровым давлением $1,5 \text{ кН/м}^2$

На рис. 10 представлены смоделированные контуры напряжений вокруг анкерных болтов для всех четырех систем соединения. Традиционный анкер демонстрировал плотно сконцентрированную зону высокоинтенсивных напряжений в небольшом радиусе от отверстия для болта. Оголовочная плита показала более широкое поле напряжений с уменьшенной пиковой величиной. Опорный кронштейн представил более постепенный градиент напряжений, распространяющийся наружу от области сердечника болта. Неразрезной кронштейн обеспечил наиболее широкое и наименее интенсивное распределение напряжений, с контурами, простирающимися далеко за пределы непосредственного местоположения болта.

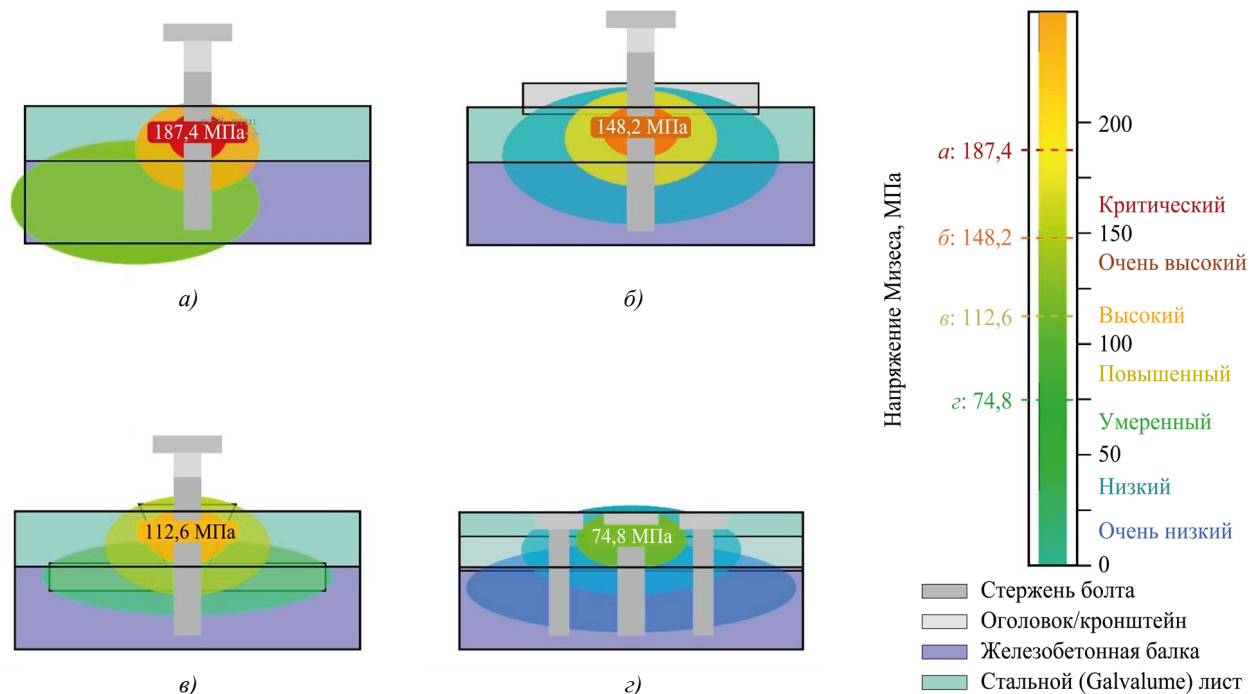


Рис. 10. Интенсивность напряжений в анкерных болтах для различных типов соединений: а — традиционный анкер; б — оголовочная плита; в — опорный кронштейн; г — неразрезной стальной каркас (сравнительные данные)

Распределение нагрузки между болтами

На рис. 11 показано соотношение распределения нагрузки на каждый болт для каждой системы соединения на протяжении 1-метрового участка соединения. Традиционный анкер, использующий 5 болтов на метр, распределял 20,0 % от общей вертикальной нагрузки на каждый болт. Оголовочная плита с 6 болтами на метр снизила нагрузку на каждый болт до 16,7 %. Опорный кронштейн с 8 болтами на метр зафиксировал 12,5 % на каждый болт. Неразрезной стальной каркас с использованием 10 болтов на метр обеспечил наиболее равномерное распределение нагрузки — 10,0 % на каждый болт, что представляет собой снижение нагрузки на каждый болт на 50,0 % по сравнению с традиционной анкерной системой.

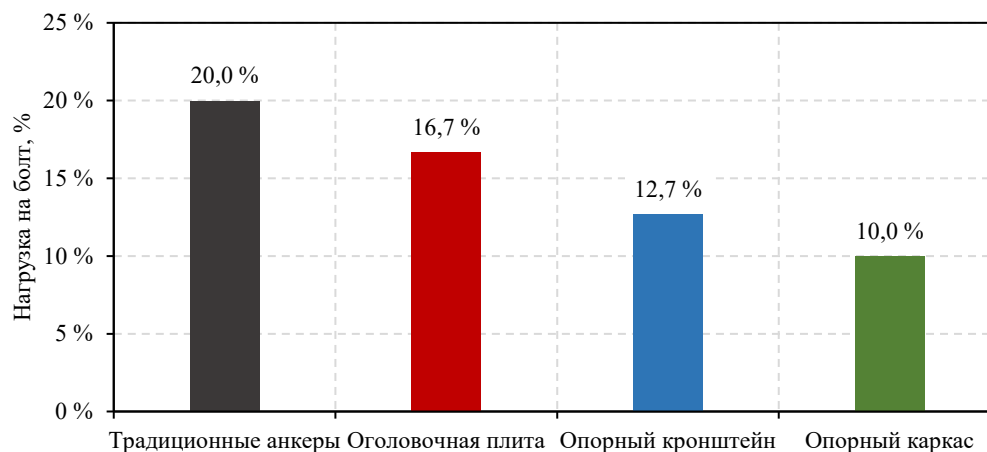


Рис. 11. Коэффициенты распределения нагрузки на болты на метр длины соединения для каждой системы базового соединения

Инерционное смещение при сейсмических воздействиях

На рис. 12 показано горизонтальное инерционное смещение кровельной системы при моделируемом сейсмическом воздействии с пиковым ускорением грунта 0,25 г. Традиционный анкер показал наибольшее боковое смещение — 22,5 мм. Оголовочная плита ограничила боковое смещение до 18,0 мм. Опорный кронштейн уменьшил горизонтальное смещение до 13,5 мм. Неразрезной стальной каркас показал наименьшее значение — 9,0 мм, что представляет собой снижение на 60,0 % по сравнению с традиционным анкером. Вертикальное смещение, вызванное сейсмическими воздействиями, оставалось ниже 3 % от вертикального смещения, вызванного ветром, для всех типов соединений при ускорениях ниже 0,3 г.

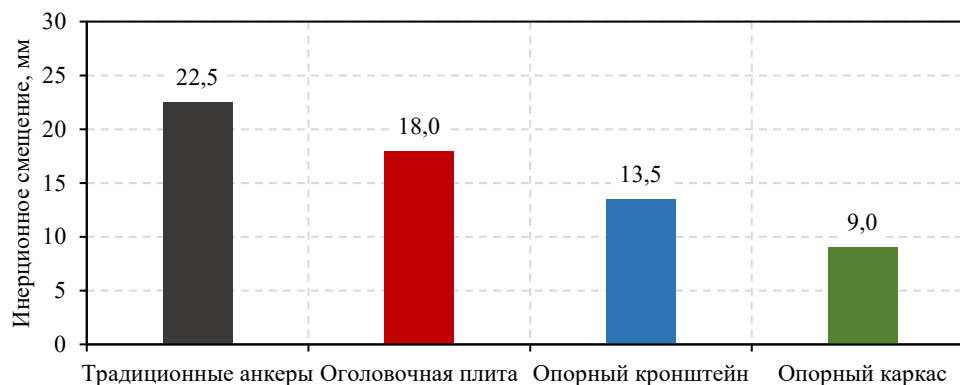


Рис. 12. Сравнение сейсмических характеристик на основе горизонтального инерционного смещения при пиковом ускорении грунта 0,25 g

Методология поверхности отклика и результаты ANOVA

Прогиб в середине пролета

Результаты дисперсионного анализа для линейной модели поверхности отклика, полученной для прогиба в середине пролета, представлены в таблице 8. Общая модель оказалась статистически значимой ($F = 5,68 \times 10^8$, $p < 0,0001$). Давление ветра (фактор А) было единственным статистически значимым предиктором ($F = 1,14 \times 10^9$, $p < 0,0001$), объясняющим всю сумму квадратов модели (56,89). Сейсмическое ускорение (фактор В) не внесло заметного вклада в реакцию прогиба в середине пролета ($F = 0,0000$, $p = 1,0000$). Остаточная ошибка составила $5,01 \times 10^{-7}$. Показатели соответствия модели данным составили: $R^2 = 1,0000$, скорректированный $R^2 = 1,0000$, прогнозируемый $R^2 = 1,0000$ и адекватная точность составила 70 172.

Таблица 8

Результаты ANOVA для реакции на прогиб в середине пролета

Источник	Сумма квадратов	Степени свободы	Среднеквадратичное значение	F-значение (критерий Фишера)	p-значение (уровень значимости)
Модель	56,89	2	28,44	$5,68 \times 10^8$	$< 0,0001$
А – ветровое давление	56,89	1	56,89	$1,14 \times 10^9$	$< 0,0001$
В – сейсмическое ускорение	0,0000	1	0,0000	0,0000	1,0000
Остаток	$5,01 \times 10^{-7}$	10	$5,01 \times 10^{-8}$		
Итого	56,89	12			

Уравнение регрессии для прогиба в середине пролета в терминах кодированных факторов представлено уравнением (6):

$$\text{прогиб (мм)} = 8,00 + 3,77 \times A + 0,0000 \times B, \quad (6)$$

где A — давление ветра; B — сейсмическое ускорение.

На рис. 13 показана трехмерная поверхность отклика для прогиба в середине пролета. Поверхность показала линейное увеличение прогиба от приблизительно 5,3 мм при 1,0 кН/м² до 10,7 мм при 2,0 кН/м². При этом поверхность отклика оставалась плоской вдоль оси сейсмического ускорения, что подтверждает отсутствие сейсмического влияния на вертикальный прогиб в пределах исследованного диапазона.

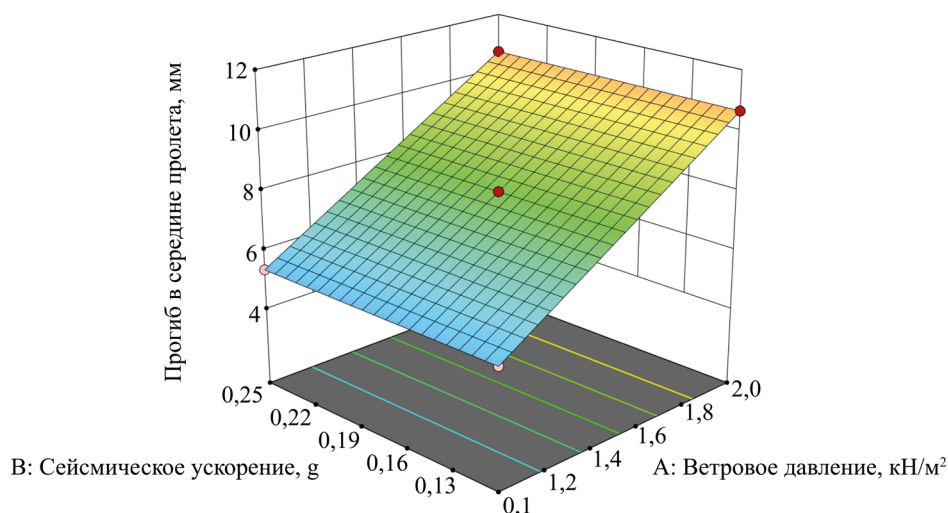


Рис. 13. Трехмерный график поверхности отклика для прогиба в середине пролета в зависимости от давления ветра и сейсмического ускорения

Интенсивность базового напряжения

Результаты дисперсионного анализа (ANOVA) для линейной модели поверхности отклика интенсивности базового напряжения представлены в таблице 9. Общая модель была статистически значимой ($F = 2,45 \times 10^9$, $p < 0,0001$). Давление ветра (фактор А) было единственным значимым предиктором ($F = 4,89 \times 10^9$, $p < 0,0001$), объясняющим 88,88 % общей дисперсии. Сейсмическое ускорение (фактор В) не показало измеримого влияния на интенсивность базового напряжения ($F = 0,0000$, $p = 1,0000$). Остаточная ошибка составила $1,82 \times 10^{-7}$. Статистические показатели соответствия модели: $R^2 = 1,0000$, скорректированный $R^2 = 1,0000$, прогнозируемый $R^2 = 1,0000$ и адекватная точность составила 145 613.

Таблица 9

Результаты ANOVA для реакции на базовое напряжение

Источник	Сумма квадратов	Степени свободы	Среднеквадратическое значение	F-значение (критерий Фишера)	p-значение (уровень значимости)
Модель	88,88	2	44,44	$2,45 \times 10^9$	$< 0,0001$
А – ветровое давление	88,88	1	88,88	$4,89 \times 10^9$	$< 0,0001$
В – сейсмическое ускорение	0,0000	1	0,0000	0,0000	1,0000
Остаток	$1,82 \times 10^{-7}$	10	$1,82 \times 10^{-8}$		
Итого	88,88	12			

Уравнение регрессии для интенсивности напряжений основания в терминах кодированных факторов представлено уравнением (7):

$$\text{базовое напряжение (кН/м}^2\text{)} = 10,00 + 4,71 \times A + 0,0000 \times B, \quad (7)$$

где A — давление ветра; B — сейсмическое ускорение.

На рис. 14 показана трехмерная диаграмма поверхности отклика интенсивности базового напряжения. Поверхность подтвердила линейное увеличение базового напряжения от приблизительно $6,7 \text{ кН/м}^2$ при $1,0 \text{ кН/м}^2$ до $13,3 \text{ кН/м}^2$ при $2,0 \text{ кН/м}^2$ без изменений вдоль оси сейсмического ускорения.

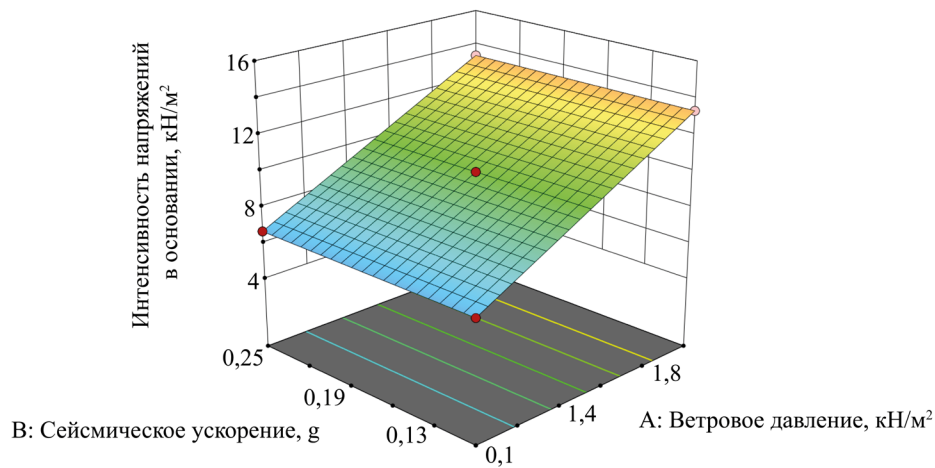


Рис. 14. Трехмерный график поверхности отклика для интенсивности базового напряжения в зависимости от давления ветра и сейсмического ускорения

Анализ желательности и контуров

На рис. 15 представлены результаты оптимизации желательности при условиях $A = 1,0 \text{ кН/м}^2$ и $B = 0,25 \text{ г}$. При этих условиях прогнозируемый прогиб в середине пролета составил $5,33 \text{ мм}$ (допустимый диапазон: $4,23\text{--}11,77 \text{ мм}$), а прогнозируемая интенсивность напряжений в основании — $6,67 \text{ кН/м}^2$ (допустимый диапазон: $5,29\text{--}14,71 \text{ кН/м}^2$). Суммарная функция желательности достигла максимального значения $0,874$.

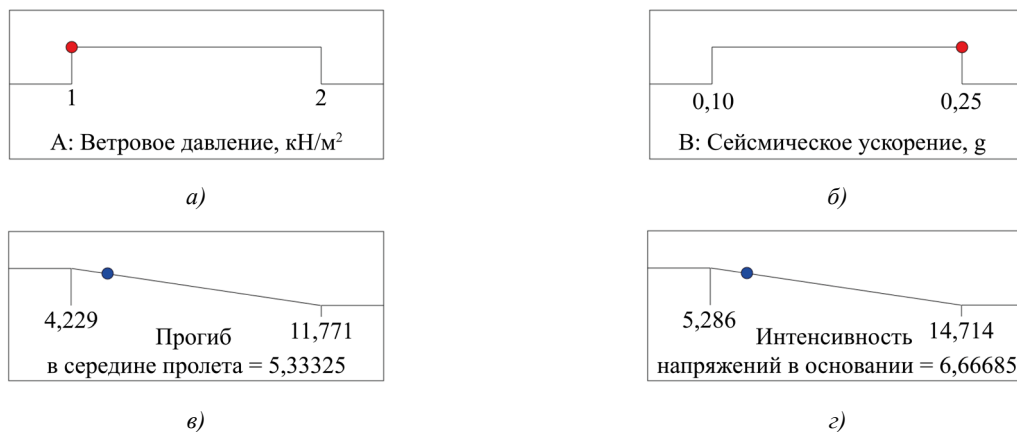


Рис. 15. Кривые желательности RSM: *a* — давление ветра; *б* — сейсмическое ускорение; *в* — прогиб в середине пролета; *г* — интенсивность напряжений в основании

Контурные графики представлены на рис. 16. Изолинии располагаются практически вертикально, что дополнительно подтверждает доминирующее влияние ветрового давления (горизонтальная ось) и незначительную чувствительность к сейсмическому ускорению (вертикальная ось).

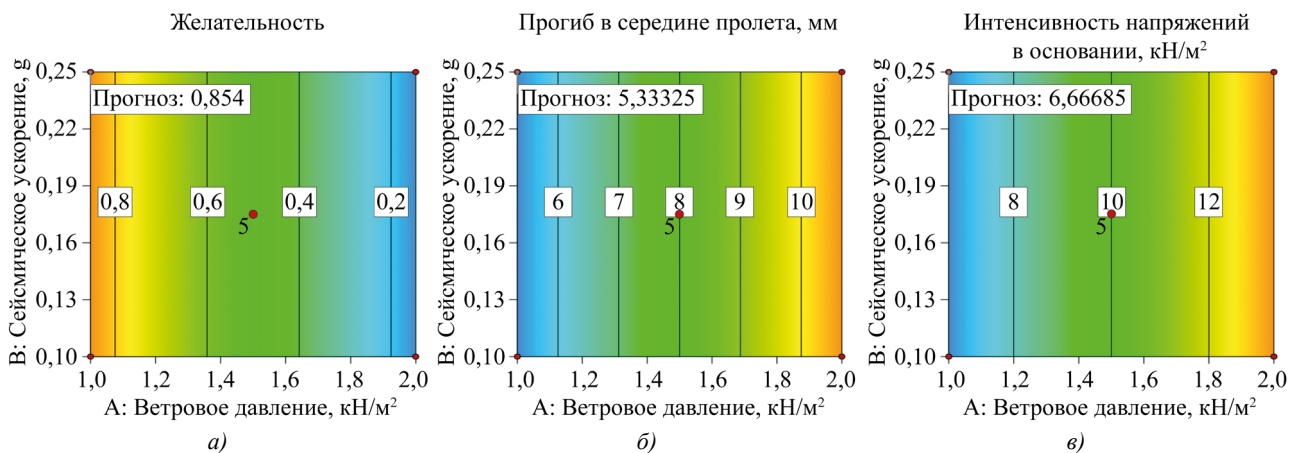


Рис. 16. Контурные графики: *a* — общая желательность; *б* — прогнозируемое отклонение в середине пролета; *в* — прогнозируемая интенсивность напряжений в основании как функция давления ветра и сейсмического ускорения

Экспериментальная валидация и перекрестная проверка

Результаты расчетов методом конечных элементов были подтверждены лабораторными экспериментальными измерениями. Прогибы в середине пролета сравнивались при семи приращениях нагрузки (0,50; 0,75; 1,00; 1,25; 1,50; 1,75 и 2,00 кН/м²) для всех четырех систем соединений, что дало в общей сложности 28 точек данных для проверки. Сравнение представлено на рис. 17. Максимальное отклонение расчетного прогиба (КЭА) от экспериментального составило 6,8 %, при этом большинство точек данных попали в диапазон погрешности ± 5 %. Расчетные напряжения в опорном узле совпали с экспериментальными значениями с точностью до 7,2 %.

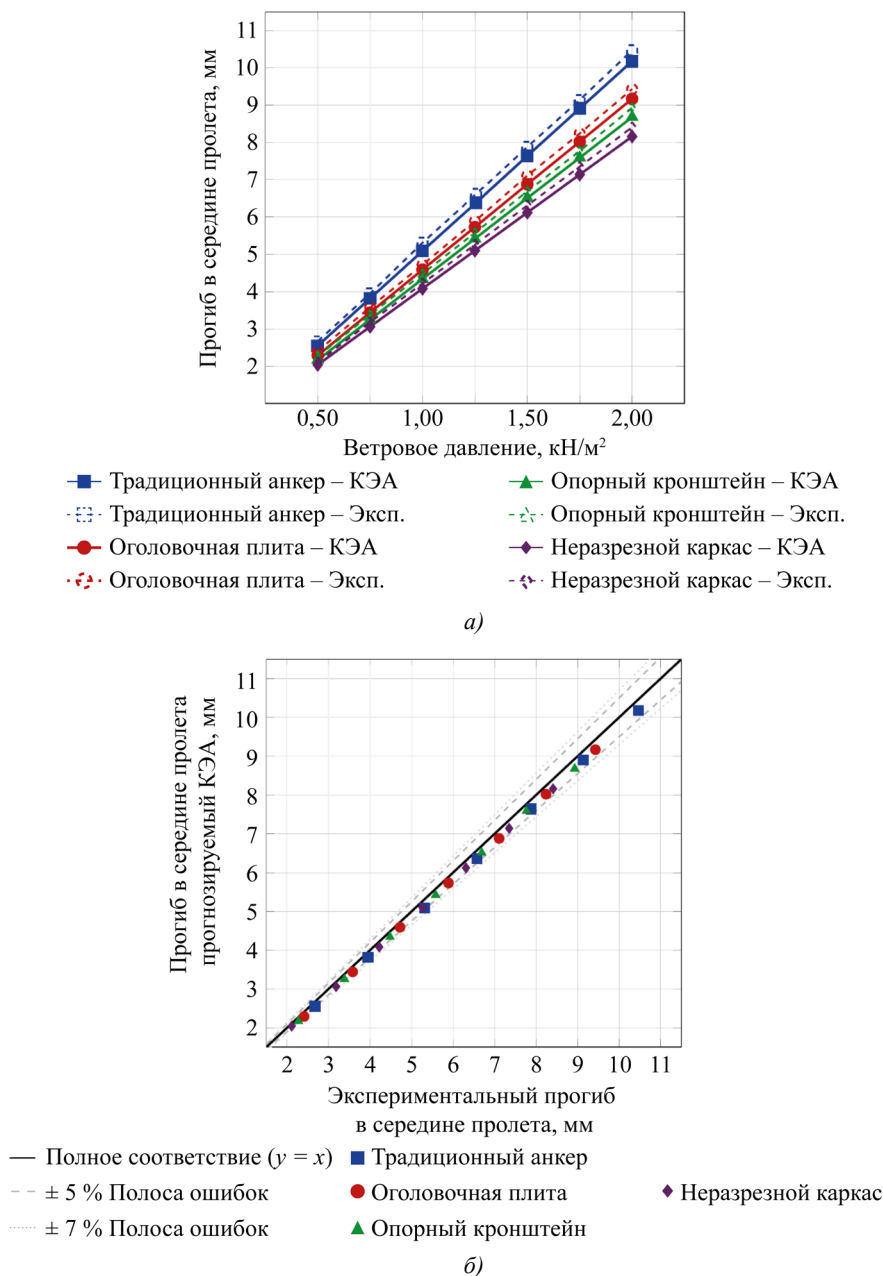


Рис. 17. Экспериментальная проверка моделей конечных элементов: а — сравнение результатов конечно-элементного анализа с экспериментальными данными о прогибе в середине пролета; б — диаграмма соответствия с погрешностью ± 5 %

Перекрестная проверка проводилась на основе независимо опубликованных экспериментальных данных из литературы. Значения прогиба в середине пролета 8,0–10,0 мм, полученные в настоящем исследовании, находились в диапазоне 7,8–11,2 мм, указанном в данных исследованиях [25]. Пиковое напряжение неразрезного каркаса, равное 74,8 МПа, находилось в диапазоне 68–82 МПа, заявленном для сопоставимых систем соединения. Уменьшение отклонения на 20 %, достигнутое с помощью неразрезного каркаса, соответствовало диапазону 18–24 %, наблюдаемому в аналогичных опубликованных исследованиях. Результаты перекрестной проверки показаны на рис. 18.

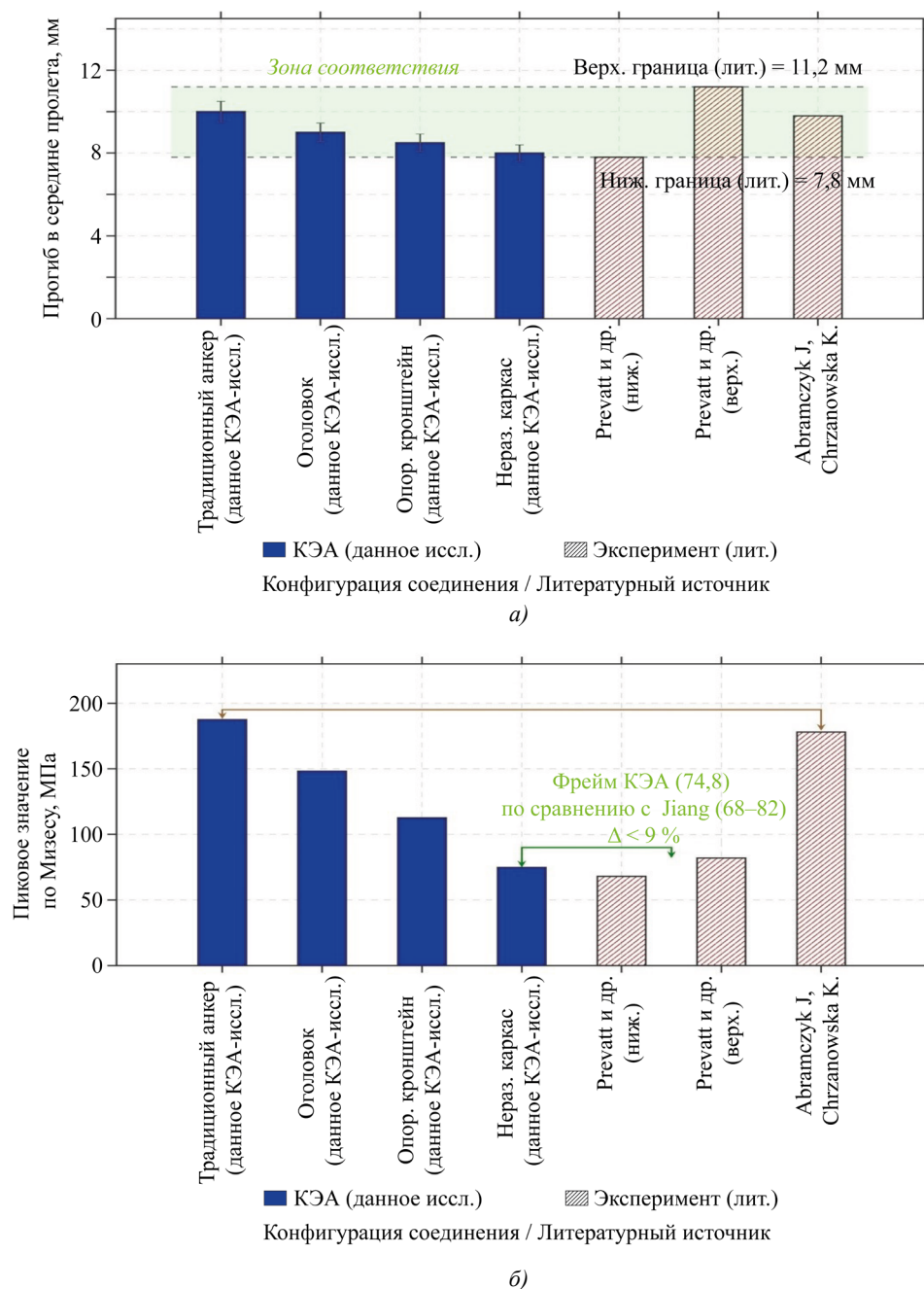


Рис. 18. Верификация результатов МКЭ по опубликованным экспериментальным данным: а — прогиб в середине пролета; б — пиковое напряжение по Мизесу в зоне контакта опорного узла

Обсуждение

Роль конфигурации соединений в управлении структурным откликом

Результаты, представленные в разделе 3, демонстрируют устойчивое и последовательное улучшение всех параметров напряженно-деформированного состояния конструкций по мере перехода от точечного анкерного закрепления к сплошному (неразрывному) опиранию по контуру. Данное улучшение обусловлено действием двух взаимосвязанных механизмов: последовательным увеличением эффективной площади контакта и переходом от передачи нагрузки через изолированные болтовые точки к ее распределению по всей контактной поверхности.

В традиционной анкерной системе вся сила ветровой нагрузки передается через ограниченное число болтовых соединений, каждое из которых окружено небольшой зоной опоры. Это концентрирует поле напряжений в узком радиусе вокруг каждого болтового отверстия, что хорошо видно по контурным линиям на рис. 10. Результирующая концентрация напряжений является основной причиной локальной деформации, ослабления болтов и потенциального разрушения соединения при многократных циклах ветровой нагрузки. Околоток создает промежуточную опорную поверхность, которая расширяет путь передачи нагрузки за пределы отдельных болтовых соединений, но передача по-прежнему осуществляется преимущественно через болты. Поле напряжений расширяется, а пиковая величина уменьшается, но дискретный характер пути передачи нагрузки сохраняется.

Опорный кронштейн обеспечивает дальнейшее улучшение за счет введения наклонного ограничения и двух-плоскостного контакта, что распределяет реакцию по большей зоне. Однако путь передачи нагрузки по-прежнему проходит через идентифицируемые группы крепежных элементов, и градиенты напряжений вокруг отдельных крепежных элементов остаются видимыми на контурных графиках. Неразрезной стальной каркас принципиально меняет механизм передачи нагрузки. Вместо того чтобы направлять всю реакцию через отдельные болты, рама распределяет реакцию по непрерывной контактной поверхности по всей длине соединения. Это устраняет локализованные пики напряжений и создает практически равномерное поле напряжений по всей области опоры.

Этот вывод согласуется с заключениями исследователей, которые показали, что разрушение кровельных систем с фальцевым соединением под воздействием ветра начинается в месте соединения, а не в результате равномерного пластического деформирования листа. Аналогично, другие исследования показали, что локальные разрушения в области зажимов и винтов предшествуют глобальному разрушению панелей в легких стальных облицовочных материалах. Хотя в указанных исследованиях рассматривались различные типы соединений и геометрия кровельных конструкций, их результаты подтверждают более общий принцип, установленный и в настоящей работе: именно жесткость соединений и неразрывность контакта, а не только прочность самого листового материала, определяют напряженно-деформированное состояние кровельной системы при воздействии эксплуатационных ветровых нагрузок.

Представленные на рис. 11 данные о распределении нагрузки на болты дают дополнительное представление о механизме процесса. По мере увеличения количества болтов на метр и непрерывности контактной поверхности, нагрузка на каждый болт пропорционально уменьшается. Снижение нагрузки на каждый болт положительно влияет на усталостную прочность и долговечность системы, что особенно важно для кровель, длительное время подвергающихся циклическим ветровым нагрузкам. 50 %-ное снижение нагрузки на каждый болт, достигнутое благодаря неразрезному каркасу, предполагает, что такая конфигурация может существенно увеличить срок службы крепежной системы, хотя испытания на циклическую усталость в данном исследовании не проводились и должны быть рассмотрены в будущих работах.

Преобладание ветрового давления и роль сейсмического ускорения

Результаты ANOVA и графики поверхности отклика, представленные в работе, подтверждают, что давление ветра является единственным статистически значимым фактором, определяющим как прогиб в середине пролета, так и интенсивность базового напряжения в пределах тестируемого пространства параметров. Сейсмическое ускорение не вызвало заметных изменений ни в одном из параметров вертикального отклика в исследованном диапазоне 0,10–0,25 г.

Этот результат физически согласуется с характером приложенной нагрузки. Давление ветра действует как непрерывная распределенная сила, перпендикулярная криволинейной поверхности крыши, непосредственно вызывая вертикальный изгиб и напряжение в зоне опоры. В отличие от этого, умеренное сейсмическое ускорение генерирует преимущественно боковые инерционные эффекты, которые проявляются в виде горизонтального смещения, а не усиления вертикального напряжения в основании. Данные о горизонтальных смещениях, представленные на рис. 12, подтверждают, что сейсмические эффекты остаются важными для оценки боковой устойчивости, но они не влияют на вертикальную эксплуатационную способность в диапазоне ускорений, изученном в данном исследовании.

Этот вывод подтверждает наблюдения недавнего исследования [26], в котором сообщалось, что вертикальное смещение, вызванное сейсмическими воздействиями, оставалось ниже 3 % от смещения, вызванного ветром, при ускорениях ниже 0,3 г. Другое исследование [27] пришло к тому же выводу на основе численного анализа надежности фальцевых кровель, где состояния повреждений определялись исключительно параметрами реакции, вызванной ветром. В этих исследованиях было установлено, что сейсмическое ускорение является значительным фактором, влияющим на вертикальную деформацию кровли при умеренных уровнях возбуждения.

Однако полученные результаты справедливы только в пределах рассмотренного диапазона сейсмических ускорений. При нагрузках свыше 0,3 г необходимо учитывать нелинейные динамические эффекты, проскальзывание в соединениях, релаксацию болтов и инерционное усиление, которые могут давать дополнительный вертикальный отклик, не учтенный в данной линейной постановке. Расширение диапазона сейсмических ускорений рекомендуется в качестве направления дальнейших исследований, особенно для сейсмоопасных регионов, где может проявляться динамическое взаимодействие горизонтальных и вертикальных перемещений.

Значимость уравнений регрессии

Уравнения регрессии, полученные в результате анализа RSM (уравнения 6 и 7), количественно подтверждают статистические данные, представленные в таблицах ANOVA: коэффициент, связанный с сейсмическим ускорением (фактор B), равен нулю в обеих моделях. Это означает, что в пределах выбранного экспериментального пространства сейсмическое ускорение не влияет на вертикальную структурную реакцию бесферменной кровельной системы. Реакция полностью определяется ветровым давлением, которое демонстрирует сильную линейную зависимость как от прогиба, так и от интенсивности напряжений в основании.

Линейность поверхности отклика в сочетании с идеальной статистикой соответствия модели ($R^2 = 1,0000$) указывает на то, что структурный отклик в пределах исследованного диапазона хорошо описывается линейной моделью первого порядка. Это имеет практическое значение для проектирования: инженеры могут прогнозировать прогиб в середине пролета и интенсивность напряжений в основании, используя только простые линейные функции давления ветра, без необходимости сложных нелинейных моделей, при условии, что нагрузка остается в пределах исследуемого диапазона. Однако при давлении, превышающем $2,0 \text{ кН/м}^2$, или при комбинированной динамической нагрузке отклик может отклоняться от линейности, и тогда потребуются модели более высокого порядка или полный нелинейный анализ.

Валидация и сравнение с опубликованными исследованиями

Валидация, представленная в работе, подтвердила, что прогнозы методом конечных элементов согласуются с экспериментальными измерениями в пределах, допустимых для расчета тонкостенных оболочек при эксплуатационных нагрузках. Максимальное расхождение составило 6,8 % по прогибу и 7,2 % по напряжениям, что соответствует общепринятым нормам для подобных конструкций. Стабильность результатов по 28 точкам и двум независимым параметрам подтверждает правильность выбранных коэффициентов трения, контактных моделей и способа учета болтов через многоточечные связи.

Перекрестная проверка на независимых опубликованных экспериментальных данных подтверждает надежность принятой расчетной модели. Рассчитанные прогибы в середине пролета лежат в диапазоне, характерном для металлических кровельных систем, подверженных ветровой нагрузке. Пиковые напряжения в узле с неразрезным каркасом также не превышают типичных значений для стальных соединений кровли при циклических нагрузках. Несмотря на различия в свойствах материалов, геометрии соединения и условиях нагружения, сопоставимые величины деформаций и напряжений указывают на то, что численная модель обеспечивает реалистичное представление структурного отклика.

Снижение прогиба в середине пролета при переходе от традиционного анкера к неразрезному каркасу хорошо согласуется с известным поведением тонкостенных кровель на непрерывных опорах. Даже с учетом возможных различий в конструктивных схемах и деталях крепления, устойчивая тенденция указывает на то, что увеличение непрерывности опорных связей повышает жесткость, более равномерно распределяет нагрузки и уменьшает общую деформации кровли.

Данное исследование дополняет имеющиеся знания прямым сравнением четырех типов узлов соединения кровли с балкой в одинаковых условиях (материалы, геометрия, ветер и сейсмика). Ранее в литературе рассматривались в основном отдельные виды соединений — шовные зажимы, скользящие опоры, крепление саморезами или сварка, — но не проводилось систематического сравнения нескольких узлов, пригодных для монтажа на объекте, в рамках одной методики. Настоящая работа восполняет этот пробел посредством совместного подхода на основе конечно-элементного анализа и методологии поверхности отклика для традиционных анкеров, оголовков, опорных кронштейнов и неразрезных каркасов в бесферменных арочных кровлях.

Инженерно-экономические аспекты

Несмотря на то, что основная задача данной работы состояла в сравнении конструктивных характеристик узлов сопряжения, в ходе исследования были также оценены дополнительные практические и экономические параметры, позволяющие более обоснованно подойти к выбору проектного решения. Результаты соответствующей оценки приведены на рис. 19–21.

Несмотря на самый высокий индекс сложности работ среди четырех систем, неразрезной каркас показал наименьшую продолжительность монтажа на 100 м кромки кровли. Это обусловлено возможностью его модульного изготовления в заводских условиях и оперативной процедурой укрупнительной сборки с выверкой положения на строительной площадке (рис. 19). Традиционный анкер, с самым низким показателем сложности, потребовал самого длительного времени монтажа из-за частых корректировок выравнивания и отсутствия модульности. Таким образом, чем выше степень заводской готовности узла, тем быстрее его монтаж на объекте, несмотря на большую трудоемкость изготовления. Это позволяет сократить общие сроки строительства.

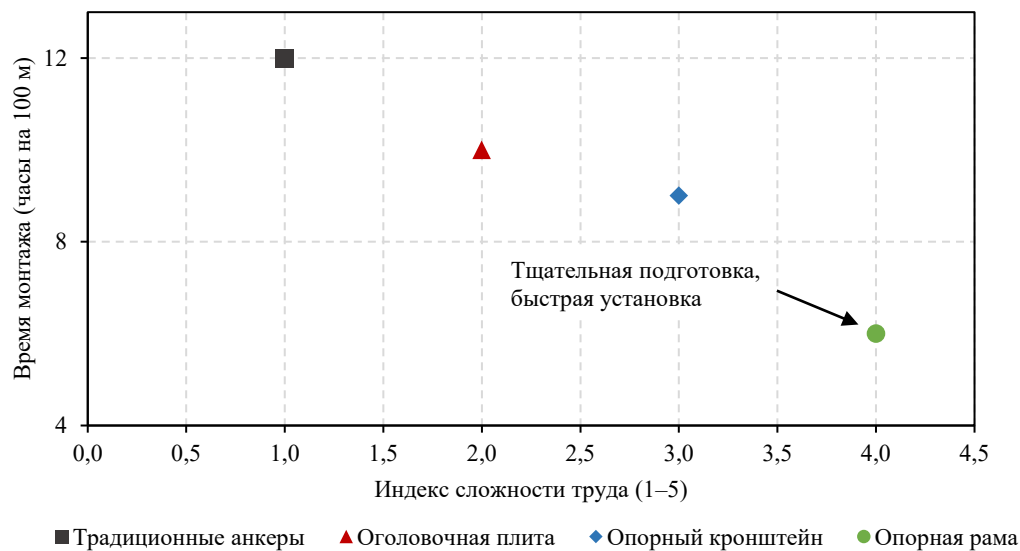


Рис. 19. Соотношение времени монтажа и сложности трудозатрат для каждой системы соединения

При оценке затрат на 20-летний период эксплуатации (рис. 20) наименьшие совокупные издержки были зафиксированы для неразрезного стального каркаса, несмотря на его максимальную первоначальную стоимость. Данный результат обусловлен сниженной периодичностью обслуживания, меньшей интенсивностью замены болтовых соединений и сокращенными требованиями к проведению инспекций благодаря распределенному характеру передачи нагрузки. Традиционный анкерный узел, обладая наименьшей начальной стоимостью, характеризуется наибольшими совокупными затратами в долгосрочной перспективе, что связано с коррозионным разрушением, усталостным повреждением болтов и необходимостью регулярной подтяжки и циклической замены крепежных элементов. Данные расчетов показывают, что если на этапе строительства вложить средства в надежные неразрезные соединения, то в будущем это окупится за счет снижения расходов на обслуживание и ремонт [28].

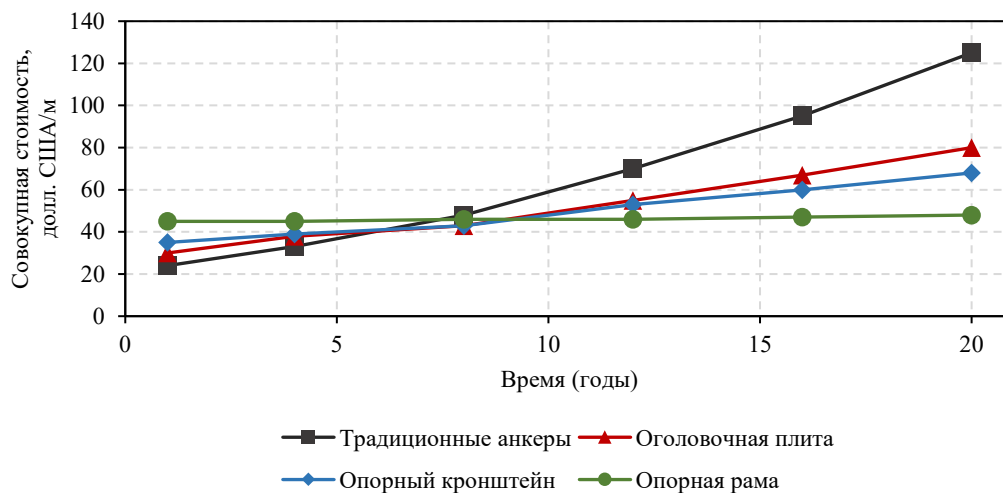


Рис. 20. Прогноз совокупных затрат за 20 лет эксплуатации для четырех типов опорных узлов

На рис. 21 представлено сравнение нормированных показателей по четырем практическим критериям: простота монтажа, конструктивные характеристики, экономическая эффективность и визуальное восприятие. Неразрезной каркас получил наивысшие оценки по конструктивным характеристикам, простоте монтажа и визуальному восприятию, но самые низкие — по первоначальной экономической эффективности. Традиционный анкер получил наивысшие оценки по первоначальной стоимости, но самые низкие — по всем показателям, связанным с эксплуатационными характеристиками. Эти практические соображения дополняют результаты структурного анализа и призваны помочь в принятии проектных решений в условиях, когда на выбор соединения влияют факторы, выходящие за рамки конструктивной прочности.

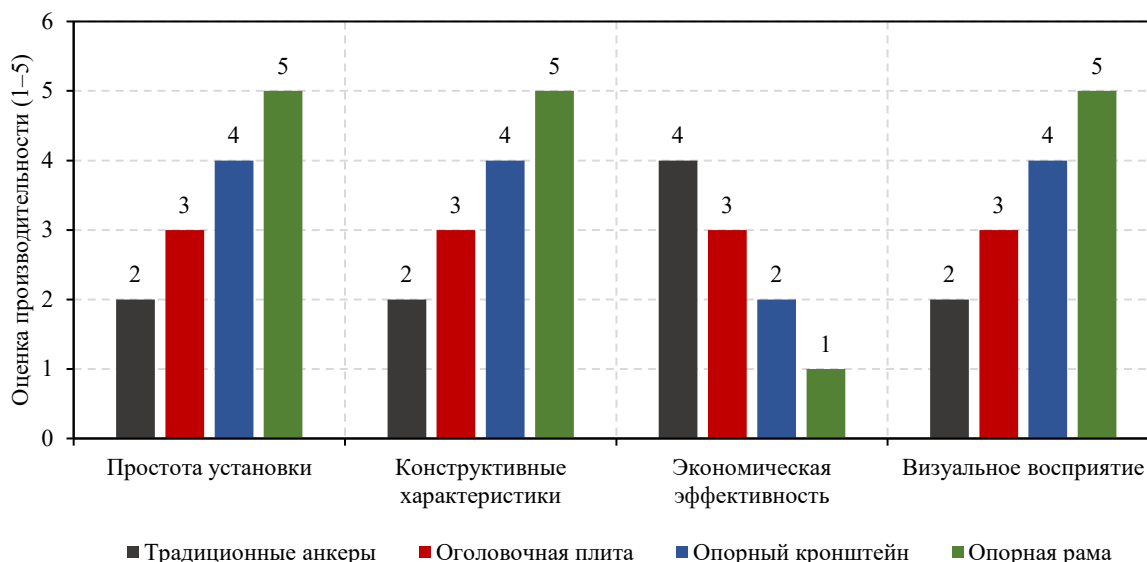


Рис. 21. Качественное сравнение эффективности типов соединения по четырём практическим показателям

Ограничения и перспективы дальнейших исследований

При интерпретации результатов и выводов данного исследования следует учитывать следующие ограничения.

1. Первичный анализ проводился в упругом диапазоне. Хотя откорректированная численная модель учитывает упругопластическое поведение материала, сравнительная оценка проводилась при эксплуатационных нагрузках, когда напряжения оставались ниже предела текучести. В будущих исследованиях предполагается расширить диапазон нагружения для изучения перераспределения усилий за пределами текучести, пластичности соединений и режимов разрушения.

2. Диапазон сейсмического ускорения, исследованный в данной работе (0,10–0,25 г), соответствует зонам низкой и умеренной сейсмичности. Выводы о незначительном влиянии сейсмического ускорения на вертикальный отклик могут не распространяться на регионы с высокой сейсмичностью, где ускорение превышает 0,3 г. Для таких задач следует рассмотреть нелинейный динамический анализ с использованием временных рядов сейсмических событий.

3. Ветровая нагрузка прикладывалась в виде равномерного статического распределения по поверхности кровли. Пространственно-изменяющиеся, флуктуирующие и динамические ветровые эффекты, такие как порывы, турбулентность и вихреобразование, не учитывались. В будущих исследованиях следует использовать методы вычислительной гидродинамики или испытания в аэродинамической трубе для оценки влияния неравномерных ветровых полей на эффективность соединений.

4. Прогнозы стоимости жизненного цикла, представленные в разделе работе, являются ориентировочными и основаны на предполагаемых графиках технического обслуживания и темпах износа, а не на данных мониторинга на местах. Для калибровки и проверки модели затрат необходим долгосрочный мониторинг установленных соединений неразрезного каркаса в условиях фактического воздействия окружающей среды.

5. Усталостное поведение при циклических ветровых нагрузках экспериментально не оценивалось. Снижение усилия на один болт, достигаемое за счет неразрезного каркаса, предполагает повышенную усталостную прочность. Однако данная гипотеза требует подтверждения в рамках специальных программ циклических испытаний.

С учетом этих ограничений рекомендуются следующие направления будущих исследований:

- крупномасштабные полевые исследования для подтверждения результатов лабораторных испытаний в различных условиях окружающей среды, включая прибрежные районы, зоны высокой влажности и экстремальных температур;
- расширение диапазона сейсмического ускорения для оценки нелинейного динамического отклика и потенциальной связи между горизонтальными и вертикальными режимами деформации;
- учет пространственно-неоднородных и изменяющихся во времени полей ветрового давления с использованием вычислительной гидродинамики или экспериментальных данных аэродинамической трубы;
- циклические усталостные испытания узлов соединений для оценки долговременной надежности при повторяющихся ветровых нагрузках
- долгосрочный полевой мониторинг установленных соединений неразрезного каркаса для калибровки модели стоимости жизненного цикла на основе фактических данных об износе.

Заключение

В данном исследовании изучалась структурная устойчивость четырех систем соединения основания кровли с балкой — традиционного механического анкера, оголовка, опорного кронштейна и неразрезного стального каркаса — для большепролетных бесферменных кровельных конструкций, изготовленных из листов стали AZ150 Galvalume с пролетом 20 м. Была разработана и проверена комбинированная методология, включающая экспериментальные данные, метод конечных элементов и метод поверхности отклика, для сравнительной оценки поведения соединений при ветровой нагрузке и эквивалентной сейсмической нагрузке.

Основной вывод заключается в том, что структурную реакцию бесферменных кровельных систем под воздействием ветровой нагрузки определяет конфигурация соединения, а не прочность листового материала. Среди четырех оцененных систем соединение с неразрезным стальным каркасом неизменно демонстрировало наиболее благоприятные показатели по всем критериям оценки, включая прогиб в середине пролета, пиковое напряжение в базовом соединении, распределение нагрузки от болтов и сейсмическое боковое смещение. Это превосходство объясняется непрерывной контактной поверхностью и механизмом распределенной передачи нагрузки, которые устраняют локализованные концентрации напряжений, присущие дискретным системам, зависящим от болтов. Оголовочная плита и опорный кронштейн представляют собой промежуточные решения, которые постепенно улучшают распределение нагрузки, но остаются хуже, чем неразрезной каркас.

Статистический анализ подтвердил, что давление ветра является единственным статистически значимым фактором, определяющим вертикальную реакцию конструкции в пределах тестируемого пространства параметров, тогда как сейсмическое ускорение в диапазоне 0,10–0,25 g не оказало заметного влияния ни на прогиб, ни на интенсивность базового напряжения. Это делает ветровую нагрузку основным фактором проектирования бесферменных соединений кровли в зонах с низкой и умеренной сейсмичностью.

Разработанные конечно-элементные модели были верифицированы путем сопоставления с экспериментальными измерениями и перекрестно проверены по независимо опубликованным данным, что подтвердило надежность и применимость принятой методики моделирования для сравнительной оценки соединений.

На основании полученных результатов в качестве предпочтительной системы соединений для большепролетных бесферменных покрытий в тех случаях, когда на первый план выдвигаются требования конструктивной безопасности, эксплуатационной пригодности и долговременной надежности рекомендуется неразрезной стальной каркас. В дальнейшем следует распространить исследования на более высокие уровни сейсмичности, неравномерные и динамические ветровые поля, циклическое усталостное поведение соединений, а также провести долгосрочный натурный мониторинг в реальных условиях внешней среды для дополнительной верификации и обобщения полученных выводов.

Список литературы / References

1. Tiwari S, Roy K, Fang Z, Lim JBP. Metal Roof Cladding System under Wind Loading: State-of-the-art. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*. 2025;257:105939. <https://doi.org/10.1016/j.jweia.2024.105939>
2. Yuchao Xia, Gregory A Kopp, Shuifu Chen. Failure Mechanisms and Load Paths in a Standing Seam Metal Roof under Extreme Wind Loads. *Engineering Structures*. 2023;296:116954. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2023.116954>
3. Qingshan Yang, Qisheng Liang, Min Liu, Shidong Nie, Ze Wang, Huiqun Wu. An Equivalent Spring Model for Seam-Clip Connections in High-Vertical Standing Seam Metal Cladding Systems. *Thin-Walled Structures*. 2024;195:111368. <https://doi.org/10.1016/j.tws.2023.111368>
4. Qisheng Liang, Qingshan Yang, Min Liu, Shidong Nie, Ze Wang, Ruolin Liu. An Efficient Method for Evaluating the Wind Resistance Performance of High-Vertical Standing Seam Metal Cladding Systems. *Thin-Walled Structures*. 2024;205:112433. <https://doi.org/10.1016/j.tws.2024.112433>
5. Bo Chen, Bin Wu, Shuo Wang. Simplified Formulas for Calculating Bearing Capacities of Standing Seam Metal Roof Systems under Uniformly Distributed Downward and Upward Loads. *Journal of Building Engineering*. 2024;96:110608. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2024.110608>
6. Tretyakov DA, Osovik DS. Estimation of Stresses in a Plate with a Concentrator through Ultrasonic Measurements of Acoustic Anisotropy. *Advanced Engineering Research (Rostov-on-Don)*. 2024;24:307–315. <https://doi.org/10.23947/2687-1653-2024-24-4-307-315>
7. Qiaoling Min, Yang Luo, Kun Yang, Mingchao Li, Mengxi Zhang, Yongji Zhang. Wind Resistance Performance Analysis of Metal Roof System of the Long-Span Integrated Photovoltaic Building. *Journal of Building Engineering*. 2024;86:108986. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2024.108986>
8. Abramczyk J, Chrzanowska K. Impact of Column Support Stiffness on the Mechanical Performance of Flat Frame Structural Systems Supporting Thin-Walled Folded Roofs. *Materials*. 2025;18(1):67. <https://doi.org/10.3390/ma18010067>
9. Khoa Vo Anh Pham, Yong-Nam Kim, Sungwoo Woo, Sung Jig Kim, Gayoon Lee, Kihak Lee. Experimental-FEA Investigation of the Structural Performance of Steel Box Connector in Precast Concrete Connection. *Journal of Building Engineering*. 2024;95:110077. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2024.110077>

10. Tao Wu, Ying Sun, Zhenggang Cao, Zhimin Yu, Yue Wu. Study on the Wind Uplift Failure Mechanism of Standing Seam Roof System for Performance-Based Design. *Engineering Structures*. 2020;225:111264. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2020.111264>
11. Ying Sun, Tao Wu, Zhenggang Cao. Wind Vulnerability Analysis of Standing Seam Roof System with Consideration of Multistage Performance Levels. *Thin-Walled Structures*. 2021;165:107942. <https://doi.org/10.1016/j.tws.2021.107942>
12. Qiaoling Min, Ning Li, Yongji Zhang, Qiaorong Lu, Xudong Liu. A Novel Wind Resistance Sliding Support with Large Sliding Displacement and High Tensile Strength for Metal Roof System. *Engineering Structures*. 2021;243:112670. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2021.112670>
13. Qiaorong Lu, Mingchao Li, Mengxi Zhang, Qiaoling Min, Yongji Zhang, Xudong Liu. Wind-Resistance Performance Investigation of 360° Vertical Seam-Locked Roof System Reinforced by Sliding Support and Sandwich Panel. *Journal of Building Engineering*. 2022;45:103689. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2021.103689>
14. Roy K. Wind-Uplift Capacity of Cold-Formed Steel Interlocking Claddings — Experimental and Numerical Investigations. *Journal of Building Engineering*. 2023;63:105433. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2022.105433>
15. Roy K. Wind-Uplift Capacity of Cold-Formed Steel Weatherboard Claddings — Experimental and Numerical Investigations. *Thin-Walled Structures*. 2023;184:110461. <https://doi.org/10.1016/j.tws.2022.110461>
16. Pieper L, Mahendran M. Numerical Investigation and Design of Crest-Fixed Corrugated Steel Claddings under Static Wind Uplift Loading. *Thin-Walled Structures*. 2023;182:110270. <https://doi.org/10.1016/j.tws.2022.110270>
17. Darwish Y, ElGawady M. Finite Element Analysis of TPO Membrane-Retrofitted Metal Roof System Subjected to Wind Loads. *Structures*. 2023;50:330–346. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2023.02.031>
18. Yuze Jiang, Zhiyong Xin, Dayang Wang, Tong Ou. Structural Fatigue Performance of L-Shaped Support in Continuous Welded Stainless Steel Roof System. *Journal of Constructional Steel Research*. 2024;214:108507. <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2024.108507>
19. Laiziu Cheng, Junfeng Cheng. Experimental Study on Static Wind Uplift Resistance of Roofing Systems. *Buildings*. 2024;14(1):65. <https://doi.org/10.3390/buildings14010065>
20. Tsybin NY. Exact and Approximate Stiffness Matrix and Nodal Load Vector for a Beam Finite Element with Linearly Varying Stiffness along Its Length. *Advanced Engineering Research (Rostov-on-Don)*. 2025;25(4):275–289. <https://doi.org/10.23947/2687-1653-2025-25-4-2206>
21. Tyurikov EV. On the Construction of Mathematical Models of the Membrane Theory of Convex Shells. *Advanced Engineering Research (Rostov-on-Don)*. 2023;23(1):17–25. <https://doi.org/10.23947/2687-1653-2023-23-1-17-25>
22. Molokov KA, Novikov VV, Dabalez M. Evaluation of the Occurrence of Initial Failures from Stress Concentrators in Welded Joints and Structural Elements. *Advanced Engineering Research (Rostov-on-Don)*. 2023;23(1):41–54. <https://doi.org/10.23947/2687-1653-2023-23-1-41-54>
23. Korol OA, Sinitin DA, Nedoseko I V, Pudovkin AN. The Effect of the Temperature Difference in the Thickness of Three-Layer Reinforced Concrete Enclosing Structures in the Operational Stage on Their Stress-Strain State. *Construction Materials and Products*. 2025;8(1):5. <https://doi.org/10.58224/2618-7183-2025-8-1-5>
24. Korol EA, Turovets PK, Solovyeva EA, Samokhodova SY, Shayakhmetov RZ. Technical Solutions and Technologies for Energy-Efficient Overhaul of Apartment Buildings. *Construction Materials and Products*. 2025;8(3):4. <https://doi.org/10.58224/2618-7183-2025-8-3-4>
25. Qisheng Liang, Qingshan Yang, Min Liu, Ruolin Liu, Wei Chen. Equivalent Spring Model and Efficient Numerical Strategy for Simulating Mechanical Performance of Seam-Clip Connections in Aluminum Alloy High-Vertical Standing Seam Metal Cladding Systems. *Engineering Structures*. 2025;322(B):119179. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2024.119179>
26. Hanizam Awang, Wan Hamidon Wan Badaruzzaman. Structural Performance and Applications of a Reversed Profiled Steel Sheeting Dry Board Roof Panel System. *Asian Journal of Civil Engineering*. 2010;11(3):371–384.
27. Ying Sun, Too Wu, Zhenggang Cao. Wind Vulnerability Analysis of Standing Seam Roof System with Consideration of Multistage Performance Levels. *Thin-Walled Structures*. 2021;165:107942. <https://doi.org/10.1016/j.tws.2021.107942>
28. Qisheng Liang, Qingshan Yang, Min Liu, Wei Chen, Ze Wang, Ruolin Liu, et al. Pullout Failure-Based Wind-Resistant Capacity of Aluminum Alloy High-Vertical Standing Seam Metal Cladding Systems. *Journal of Building Engineering*. 2025;111:113242. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2025.113242>

Об авторах:

Сачин Балкришна Мулай, доктор технических наук, профессор кафедры «Гражданское строительство» университета Сандип, Насик (Насик, штат Махараштра, 422213, Индия), [ORCID](#), [ScopusID](#), sachin.mulay@sandipuniversity.edu.in

Сурья Пракаш, магистр технических наук, аспирант кафедры «Гражданское строительство» университета Сандип, Насик (Насик, штат Махараштра, 422213, Индия), [ORCID](#), [ResearcherID](#), spsingh.imd@gmail.com

Заявленный вклад авторов:

Сачин Балкришна Мулай: разработка концепции, научное руководство, написание рукописи и редактирование.

Сурья Пракаш: проведение исследования, курирование данных, формальный анализ, написание черновика рукописи.

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Декларация ИИ: авторы заявляют, что при подготовке текста рукописи не использовались технологии генеративного искусственного интеллекта (ИИ), ИИ не является соавтором публикации: авторство присвоено только физическим лицам, внёсшим существенный интеллектуальный вклад в исследование.

About the Authors:

Sachin Balkrishna Mulay, Dr.Sci. (Eng.), Professor of the Department of Civil Engineering, Sandip University (Nashik, Maharashtra, 422213, India), [ORCID](#), [ScopusID](#), sachin.mulay@sandipuniversity.edu.in

Surya Prakash, M.Sci. (Eng.), Postgraduate Student of the Department of Civil Engineering, Sandip University (Nashik, Maharashtra, 422213, India), [ORCID](#), [ResearcherID](#), spsingh.imd@gmail.com

Claimed contributorship:

Sachin Balkrishna Mulay: conceptualization, supervision, writing & editing.

Surya Prakash: investigation, data curation, formal analysis, writing – original draft.

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

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

AI Declaration: the authors declare that generative artificial intelligence (AI) technologies were not used in the preparation of the manuscript and that AI is not a co-author of the publication: authorship is assigned only to natural persons who have made a substantial intellectual contribution to the research.

Поступила в редакцию / Received 18.05.2026

Поступила после рецензирования / Reviewed 19.06.2026

Принята к публикации / Accepted 06.07.2026

МЕХАНИКА
MECHANICS

УДК 534-14 /-16

Оригинальное теоретическое исследование

<https://doi.org/10.23947/2687-1653-2026-26-3-2751>

Нейросетевая технология мониторинга поврежденного состояния протяженной конструкции на основе анализа нестационарных волн

О.К. Абраха^{1,2} , А.Н. Соловьев¹

¹ Донской государственный технический университет, г. Ростов-на-Дону, Российская Федерация, <https://ror.org/00x5je630>

² Колледж науки, Эритрейский институт технологий, Май-Нэфхи, Эритрея
✉ solovievare@gmail.com



EDN: TGIIXG

Аннотация

Введение. Разрушение поверхностного слоя бетонных конструкций под воздействием агрессивной среды относится к числу наиболее распространенных видов повреждений, требующих дистанционного автоматизированного мониторинга. Для решения данной задачи могут применяться акустические методы неразрушающего контроля. Вместе с тем существующие подходы, в том числе ранее разработанный нами метод пересечения контурных линий, характеризуются недостаточной устойчивостью в области низкой пористости — менее 15 % — вследствие слабой зависимости амплитуды сигнала от времени. В связи с этим была выявлена проблема, заключающаяся в том, что применяемые методы не обеспечивают надежного определения параметров повреждения во всем диапазоне их значений. Цель настоящей работы — разработка нейросетевой технологии устойчивой идентификации глубины и пористости поврежденного слоя протяженной конструкции на основе анализа нестационарных волн; это определяет уникальность и научную новизну исследования.

Материалы и методы. Исследование выполнено на основе численного моделирования. В качестве механической модели рассматривается двухслойная упругая анизотропная полоса толщиной $H = 1$ см с верхним поврежденным слоем, моделируемым пористым композитом, эффективные свойства которого рассчитаны в пакете ACELAN-COMPOS. Параметрами повреждения являются толщина слоя h (0,05–0,3 см) и пористость p (10–80 %). На поверхности полосы расположены пьезоэлектрические актуатор и сенсор из керамики PZT-4 с вертикальной поляризацией. Нестационарные волны возбуждаются разностью потенциалов на актуаторе и регистрируются сенсором. Для получения обучающих данных методом конечных элементов в пакете ACELAN с использованием квадратичных треугольных элементов (сетка: 5616 элементов, 12 155 узлов) решена серия прямых задач для 48 сочетаний параметров. На основе кубической интерполяции сгенерированы обучающий (10 000 точек) и тестовый (40 000 точек) наборы данных. Построена нейронная сеть прямого распространения — многослойный персептрон с четырьмя скрытыми слоями (128–64–32–16 нейронов), функцией активации ReLU, слоями дропаута (20 %) и оптимизатором Adam; для уменьшения положительной асимметрии прогнозов использована взвешенная функция потерь.

Результаты исследования. На независимом тестовом наборе обученная сеть достигает средней абсолютной ошибки 2,433 % для пористости и 0,121 мм для глубины ($R^2 = 0,977$ и $0,910$ соответственно). В области низкой пористости ($p < 15$ %) ошибка составляет 0,405 % для пористости и 0,173 мм для глубины при смещении всего +0,188 %, что подтверждает надежность подхода в данной области. Все 40 000 тестовых точек дают уникальные двумерные сигнатуры, что эмпирически подтверждает единственность решения обратной задачи.

Обсуждение. Полученные данные подтверждают, что предложенная нейросетевая технология позволяет преодолеть фундаментальное ограничение метода пересечения контурных линий, обеспечивая устойчивое прогнозирование во всем диапазоне значений пористости. Использование взвешенной функции потерь эффективно снижает систематическое завышение прогнозируемых значений данного параметра. Ограничением предложенного подхода остается допущение о постоянстве пористости по глубине и длине поврежденного слоя. Учет пространственных неоднородностей потребует решения обратной задачи существенно более высокой сложности. В дальнейших исследованиях планируется выйти за рамки анализа только двух выделенных признаков и перейти к использованию полного временного сигнала, в том числе с применением сверточных архитектур.

Заключение. Разработанная в данном исследовании нейросетевая технология обеспечивает эффективный метод идентификации параметров повреждения во всем диапазоне значений, преодолевая ограничения существующих методов. Полученные результаты подтверждают применимость предложенного подхода для систем акустического мониторинга протяженных бетонных конструкций.

Ключевые слова: обратная задача, акустический мониторинг, пьезоэлектрический датчик, нейронные сети

Благодарности. Авторы выражают благодарность редакции журнала и рецензентам за внимательное отношение к статье.

Финансирование. Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, соглашение № 075-02-2026-1313.

Для цитирования. Абраха О.К., Соловьев А.Н. Нейросетевая технология мониторинга поврежденного состояния протяженной конструкции на основе анализа нестационарных волн. *Advanced Engineering Research (Rostov-on-Don)*. 2026;26(3):2751. <https://doi.org/10.23947/2687-1653-2026-26-3-2751>

Original Theoretical Research

Neural Network Technology for Monitoring the Damaged State of an Extended Structure Based on Analysis of Non-stationary Waves

Okbazghi Kibreab Abraha^{1,2} , Arkadiy N. Soloviev¹  

¹ Don State Technical University, Rostov-on-Don, Russian Federation, <https://ror.org/00x5je630>

² College of Science, Eritrea Institute of Technology, Mai-Nefhi, Eritrea

 solovievare@gmail.com

Abstract

Introduction. Destruction of the surface layer of concrete structures caused by an aggressive environment is one of the most common types of damage that require remote and automatic monitoring. Acoustic non-destructive testing methods can address this problem. However, the existing approaches, including the contour line intersection method we previously developed, demonstrate instability in the low-porosity region (less than 15%) because of the weak dependence of signal amplitude on time. So, we identified a problem that existing methods cannot reliably identify damage parameters across the whole range of values. The objective of this work is to develop a neural network technology for the robust identification of the depth and porosity of the damaged layer of an extended structure based on the analysis of non-stationary waves, which determines the uniqueness and scientific novelty of the study.

Materials and Methods. The study is based on numerical simulation. The mechanical model is a two-layer elastic anisotropic strip of thickness $H = 1$ cm with an upper damaged layer modeled as a porous composite whose effective properties calculated in the ACELAN-COMPOS package. The damage parameters are layer thickness h (0.05–0.3 cm) and porosity p (10–80%). A piezoelectric actuator and sensor made of PZT-4 ceramics with vertical polarization are placed on the surface of the strip. Non-stationary waves are excited by a potential difference on the actuator and recorded by the sensor. To obtain training data, a series of direct problems for 48 parameter combinations were solved using the finite element method in the ACELAN package with quadratic triangular elements (mesh: 5,616 elements; 12,155 nodes). Based on cubic interpolation, training (10,000 points) and test (40,000 points) datasets were generated. A feedforward neural network, a multilayer perceptron with four hidden layers (128-64-32-16 neurons), ReLU activation function, dropout layers (20%), and Adam optimizer was constructed and a weighted loss function was used to reduce positive asymmetry in predictions.

Results. On the independent test set, the trained network achieves a mean absolute error of 2.433% for porosity and 0.121 mm for depth ($R^2 = 0.977$ and 0.910 , respectively). In the low-porosity region ($p < 15\%$), the error is 0.405% for porosity and 0.173 mm for depth with a bias of only +0.188%, confirming the reliability of the approach in the region. All 40,000 test points yield unique two-dimensional signatures, empirically confirming the uniqueness of the inverse problem solution.

Discussion. The obtained data confirm that the proposed neural network technology overcomes the fundamental limitation of the contour line intersection method, providing stable predictions across the entire porosity range. The use of a weighted loss function effectively reduces systematic overestimation of porosity predictions. A limitation of the approach is the assumption of constant porosity along the depth and length of the layer. Accounting for inhomogeneities would require solving an inverse problem of significantly higher complexity. In future work, we plan to move beyond just two extracted features and instead use the full time-domain signal, possibly with convolutional architectures.

Conclusion. The neural network technology developed in this research provides an effective method of identification of damage parameters across the entire range of values, overcoming the limitations of existing methods. The obtained results confirm the applicability of the proposed approach for acoustic monitoring systems of extended concrete structures.

Keywords: inverse problem, acoustic monitoring, piezoelectric sensor, neural networks

Acknowledgments. The authors would like to thank the Editorial board and reviewers for their careful attention to the manuscript.

Funding Information. This work was financially supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (Agreement No. 075-02-2026-1313).

For Citation. Abraha OK, Soloviev AN. Neural Network Technology for Monitoring the Damaged State of an Extended Structure Based on Analysis of Non-stationary Waves. *Advanced Engineering Research (Rostov-on-Don)*. 2026;26(3):2751. <https://doi.org/10.23947/2687-1653-2026-26-3-2751>

Введение. Интеграция пьезоэлектрических актуаторов и датчиков в системы акустического мониторинга состояния строительных конструкций, или мониторинга технического состояния конструкций (Structural Health Monitoring, SHM) доказала свою эффективность при выявлении и характеристике повреждений в бетонных элементах. Разрушение поверхностного слоя, обусловленное воздействием агрессивной среды, относится к наиболее распространенным видам повреждений, для которых необходим дистанционный и автоматизированный контроль. Акустические методы неразрушающего контроля позволяют решать данную задачу. Вместе с тем существующие подходы имеют существенные ограничения, особенно в области низкой пористости, где их результаты становятся нестабильными. Настоящий обзор обобщает недавние публикации, посвященные применению нейронных сетей для идентификации повреждений на основе акустических волн, с акцентом на методы, непосредственно применимые для развития настоящего исследования.

Обзор, выполненный в [1], охватывает подходы, основанные на интеллектуальном анализе данных, к оценке долговечности и прогнозированию эксплуатационных характеристик бетонных конструкций. Авторы четко обозначили тенденцию перехода от физических моделей к гибридным моделям, управляемым данными. В [2] рассмотрено применение искусственного интеллекта в мониторинге мостов и установили, что машинное обучение играет значимую роль в интерпретации данных, получаемых с помощью датчиков различных методов неразрушающего контроля. Работа [3] посвящена акустике как инструменту мониторинга технического состояния конструкций, что тесно связано с подходом, используемым в настоящем исследовании. В [4] представлен широкий обзор применения глубокого обучения в мониторинге технического состояния конструкций, включающий сверточные нейронные сети, автокодировщики и рекуррентные нейронные сети как для вибрационных, так и для волновых методов. Наконец, в [5] рассмотрены методы мониторинга технического состояния конструкций на основе искусственного интеллекта, отметив переход от традиционного машинного обучения к глубокому обучению в задачах обнаружения и классификации повреждений.

Важным достижением вычислительной механики является интеграция физических законов с архитектурами нейронных сетей. Например, в [6] представлены физико-информированные нейронные сети (Physics-Informed Neural Networks, PINN). Данный подход предполагает включение определяющих дифференциальных уравнений в частных производных в функцию потерь. Это позволяет сети решать как прямые, так и обратные задачи с нелинейными уравнениями в частных производных. Авторы [7] развили этот подход, применив физико-информированные нейронные сети для ультразвукового обнаружения дефектов в бетонных плитах. Они установили, что встраивание уравнений распространения волн в архитектуру сети повышает как надежность, так и интерпретируемость результатов. Предложенный метод показал хорошие результаты даже при ограниченном объеме обучающих данных, что особенно важно в условиях, когда экспериментальные данные трудно получить. Это согласуется с рассматриваемой в настоящей работе обратной задачей, поскольку определяющие уравнения распространения волн в двухслойной анизотропной полосе могут служить физической основой для подхода на базе физико-информированных нейронных сетей.

Акустическая эмиссия (АЭ) и ультразвуковой контроль формируют информативные временные сигналы, содержащие критически важные сведения о местоположении, степени выраженности и типе повреждения. Авторы [8] применили глубокое остаточное обучение для локализации источников акустической эмиссии в стале-бетонных композитных плитах и показали, что сверточные нейронные сети способны точно определять местоположение источников повреждения по сигналам АЭ. В работе [9] разработана система анализа ультразвуковых волн с использованием искусственного интеллекта для автоматизированной классификации повреждений бетона, вызванных коррозией стали, и продемонстрировано, что нейронные сети могут различать механизмы повреждения на основе волновых характеристик. В [10] авторы исследовали обнаружение и классификацию повреждений конструкций с помощью алгоритмов машинного обучения, получив первые свидетельства эффективности подходов с учителем для волнового мониторинга технического состояния. В [11] проведено экспериментальное исследование по мониторингу развития повреждений в бетонных плитах, армированных базальтопластиковой арматурой, с применением акустической эмиссии и машинного обучения. Авторы объединили

кластеризацию без учителя с классификацией методом k-ближайших соседей, k-NN, и достигли точности 99,2 % при классификации механизмов повреждения. Они также использовали анализ SHAP для количественной оценки вклада каждого признака акустической эмиссии в прогнозирование ширины трещины — данный метод непосредственно применим для идентификации пористости и глубины по сигналам датчиков. Авторы [12] разработали основанную на глубоком обучении структуру для прогнозирования остаточного ресурса бетонных конструкций с использованием данных акустической эмиссии. В ней глубокая нейронная сеть на основе стекового автокодировщика применяется для построения индикатора состояния, а рекуррентная нейронная сеть с долгой краткосрочной памятью, LSTM-RNN, — для прогнозирования. При этом процедура удаления ложных сигналов с помощью одноклассового метода опорных векторов используется для фильтрации релевантных событий АЭ.

Пьезоэлектрические датчики занимают центральное место в экспериментальной установке, используемой в данном исследовании. Авторы [13] применили глубокое обучение в сочетании с методами обновления конечно-элементной модели для разработки подхода к обнаружению повреждений конструкций, продемонстрировав, как нейронные сети могут изучать отображение между измерениями датчиков и параметрами повреждения. В [14] проведено сравнительное исследование методов машинного и глубокого обучения без учителя для выявления повреждений конструкций. Данная работа дает представление о подходах, не требующих размеченных данных о дефектах. Работа [15] представила платформу цифрового двойника, интегрирующую многоуровневое мультифизическое моделирование с машинным обучением для обнаружения повреждений в пьезоэлектрических композитных структурах с использованием измерений электрических сигналов. В рамках этой платформы искусственная нейронная сеть применяется для определения конститутивных коэффициентов, а сверточная LSTM-сеть — для прогнозирования повреждений по электрическим сигналам при ограниченном количестве датчиков.

В обратных задачах, где требуется многократный запуск прямых численных расчетов, нейронные сети могут выступать в качестве суррогатных моделей, аппроксимирующих отображение параметров повреждения в волновые сигналы. Применяя глубокое обучение, авторы [16] смогли спрогнозировать траектории распространения трещин в бетоне и показали, что нейронные сети способны улавливать сложную эволюцию повреждений. Авторы [17] продемонстрировали метод прогнозирования на основе глубокого обучения для идентификации проникновения хлоридов в бетон с течением времени и подчеркнули более широкую применимость таких методов для оценки долговременной долговечности.

Помимо глубокого обучения, традиционные методы машинного обучения сохраняют актуальность для отдельных приложений мониторинга технического состояния конструкций. В работе [18] применена методология поверхности отклика в сочетании с искусственными нейронными сетями для оптимизации сенсорных возможностей сплавов с памятью формы при обнаружении трещин в бетоне. Авторы [19] исследовали реакцию сигнала магнитного потока утечки для определения усталостного ресурса железобетонных балок. Хотя модальность измерения в этой работе отличается, использование нейронных сетей для извлечения чувствительных к повреждениям признаков из сложных сигналов применимо и к данным пьезоэлектрических датчиков.

Несколько дополнительных исследований содержат ценные методологические идеи. В работе [20] представлен систематический обзор интеграции методов искусственного интеллекта с инфракрасной термографией для обнаружения дефектов в бетонных конструкциях. В [21] разработан метод прогнозирования механических свойств бетона на основе изображений с использованием сегментации сверточной нейронной сетью, CNN, и моделирования искусственной нейронной сетью, ANN. Авторы [22] применили глубокое обучение и анализ текстур для идентификации трещин в мостах, вызванных щелочно-кремнеземной реакцией. В работе [23] разработана модель машинного обучения для контроля температурного трещинообразования, представляющего собой серьезную проблему для массивных монолитных конструкций на стадии изготовления.

Таким образом, анализ литературы выявляет несколько перспективных направлений для настоящей работы. Физически-информированные нейронные сети, встраивающие волновые уравнения в процесс обучения [6, 7], обеспечивают повышенную надежность и интерпретируемость при решении обратных задач. Прямая обработка сигналов акустической эмиссии и ультразвук с помощью глубоких остаточных сетей [4, 8, 9] устраняет необходимость в ручном выделении признаков. Недавние достижения продемонстрировали возможность объединения акустической эмиссии с машинным обучением для классификации повреждений [11], применения глубокого обучения для прогнозирования остаточного ресурса [12], а также использования платформ цифровых двойников, интегрирующих нейронные сети с данными пьезоэлектрических датчиков [15]. Глубокое обучение для локализации повреждений [8, 13] непосредственно соответствует задаче идентификации параметров повреждения, решаемой в настоящем исследовании. Гибридные методы, сочетающие экспериментальное планирование с прогнозированием на основе нейронных сетей [18, 19], предлагают методологические шаблоны. Суррогатное моделирование, предназначенное для ускорения прямых численных расчетов [16, 17], обеспечивает быстрый поиск

в пространстве параметров. Основанные на конечных элементах структуры глубокого обучения [13, 15] объединяют данные численного моделирования с нейронными сетями для идентификации повреждений. Основополагающие обзоры [1, 2, 4, 5] формируют широкий контекст применения искусственного интеллекта в мониторинге технического состояния конструкций и акустике.

Каждый из перечисленных подходов может быть адаптирован к конкретной задаче, решаемой в данной работе, — двухслойной анизотропной полосе с поврежденным поверхностным слоем, возбуждаемой пьезоэлектрическим актуатором, при регистрации сигналов пьезоэлектрическим сенсором. Упругие волны в полосе возбуждаются пьезоэлектрическим актуатором, а регистрация сигналов после их прохождения вдоль полосы осуществляется пьезоэлектрическим сенсором.

Ранее был разработан подход к идентификации параметров повреждения, а именно глубины и пористости, путем пересечения линий уровня поверхностей максимальной амплитуды и времени ее достижения. Однако данный метод становится нестабильным в области низкой пористости, составляющей менее 15 %. Причина заключается в том, что амплитуда сигнала в этом режиме практически не зависит от времени. Таким образом, выявлен пробел: отсутствует надежный способ идентификации параметров повреждения во всем диапазоне значений, особенно в области низкой пористости.

Цель настоящей работы — разработать нейросетевую технологию, позволяющую надежно идентифицировать глубину и пористость поврежденного слоя протяженной конструкции на основе анализа нестационарных волн, что обеспечивает преодоление ограничений существующих методов. Для достижения этой цели были определены четыре основные задачи. Во-первых, построена конечно-элементная модель двухслойной полосы с пьезоэлектрическими актуатором и сенсором для генерации обучающих данных. Во-вторых, сформированы обучающий и тестовый наборы данных путем решения серии прямых задач. В-третьих, разработана и обучена нейронная сеть для отображения измеряемых характеристик сигнала в параметры повреждения. Наконец, оценены точность и устойчивость предложенного подхода с особым вниманием к области низкой пористости, в которой предыдущие методы демонстрировали недостаточную стабильность.

Следует отметить, что проблемы повреждения связаны со свойствами материалов. В ряде работ предлагаются технологии, которые в значительной мере повышают эти свойства. Так в работе [24] осуществляется проектирование бетона, укрепленного стальными волокнами методом шликерного формования, который является одним из эффективных и перспективных методов заливки бетонных смесей. В работе [25] предлагается мелкозернистый цементный бетон модифицировать с использованием высокодисперсным базальтовым техногенным порошком.

Материалы и методы. Модель конструкции. Рассматривается упругая анизотропная двухслойная полоса (рис. 1) толщиной H в декартовой системе координат x_1, x_2, x_3 . Верхний поврежденный слой толщиной h моделируется пористым композитом с процентным содержанием пористости p . На поверхности слоя расположены пьезоэлектрические датчик и приемник, обозначенные на рисунке 1 цифрами 1 и 2 соответственно. Верхняя и нижняя плоскости полосы свободны от механических напряжений. Возбуждение волн в полосе осуществляется за счет разности электрических потенциалов на электродах датчика, а регистрация сигнала, то есть электрического потенциала, прошедшего по конструкции, выполняется приемником, нижний электрод которого заземлен, а верхний остается свободным. Выбор пьезоэлектрических элементов в качестве источника и приемника не является случайным: во-первых, их можно интегрировать в конструкцию на этапе ее изготовления; во-вторых, если в процессе эксплуатации конструкция подвергается динамическим воздействиям, такие элементы могут одновременно выполнять функции пьезоэлектрических генераторов (ПЭГ) в устройстве накопления энергии [26]. Таким образом, устройство мониторинга, соответствующее предложенной схеме, является автономным и не требует дополнительного источника энергии.

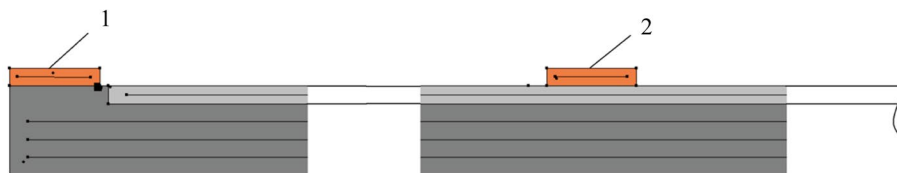


Рис. 1. Схема конструкции с актуатором и сенсором

Поврежденный слой, который моделируется пористым материалом, заменяется сплошным с эффективными упругими свойствами. Эти свойства и плотность рассчитывались в пакете ACELAN-COMPOS [27] и представлены в таблице 1. Нулевое значение пористости определяет свойства неповрежденной полосы. Актуатор и сенсор выполнены из пьезокерамики PZT-4 с вертикальной поляризацией (производство: Morgan Advanced Materials, Великобритания, или аналогичный коммерчески доступный материал). Расчеты выполнены при нормальных условиях (температура 20 °C, атмосферное давление).

Эффективные свойства [28]

% пористости	0	10	20	30	40	50	60	70	80
$\rho, 10^3, \text{kg/m}^3$	7,50	6,75	6,00	5,25	4,50	3,75	3,0	2,25	1,50
$c_{11}^{Eff}, 10^{10}, \text{N/m}^2$	13,90	11,56	9,25	6,85	5,05	3,34	2,07	1,26	0,68
$c_{12}^{Eff}, 10^{10}, \text{N/m}^2$	7,78	6,15	4,66	3,14	2,10	1,16	0,62	0,28	0,13
$c_{13}^{Eff}, 10^{10}, \text{N/m}^2$	7,43	5,82	4,25	2,82	1,87	1,06	0,52	0,24	0,10
$c_{33}^{Eff}, 10^{10}, \text{N/m}^2$	11,50	9,53	7,23	5,42	3,91	2,72	1,63	0,91	0,47
$c_{44}^{Eff}, 10^{10}, \text{N/m}^2$	2,56	2,23	1,83	1,44	1,10	0,74	0,44	0,23	0,10

Математическая постановка задачи. В работе рассматривается модель для системы упругих и электроупругих тел в плоской постановке [29]. Индекс j отвечает за нумерации тел, система дифференциальных уравнений, описывающая нестационарные механическое и электрическое поля, имеет вид:

$$\begin{aligned} \rho_j \ddot{\mathbf{u}} + \alpha_j \rho_j \dot{\mathbf{u}} - \nabla \cdot \boldsymbol{\sigma} &= \mathbf{f}_j; \nabla \cdot \mathbf{D} = 0; \\ \boldsymbol{\sigma} &= \mathbf{c}_j^E \cdot (\boldsymbol{\varepsilon} + \beta_{dj} \dot{\boldsymbol{\varepsilon}}) - \mathbf{e}_j^T \cdot \mathbf{E}; \mathbf{E} = -\nabla \varphi; \\ \mathbf{D} + \zeta_d \dot{\mathbf{D}} &= \mathbf{e}_j \cdot (\boldsymbol{\varepsilon} + \zeta_d \dot{\boldsymbol{\varepsilon}}) + \varepsilon_j^S \cdot \mathbf{E}; \boldsymbol{\varepsilon} = (\nabla \mathbf{u} + \nabla \mathbf{u}^T) / 2, \end{aligned} \quad (1)$$

где $\boldsymbol{\sigma}$ — тензор напряжений; ρ_j — плотность тела; $\boldsymbol{\varepsilon}$ — тензор деформаций; $\mathbf{u}$ — вектор перемещений; $\mathbf{D}$ — вектор электрической индукции; $\mathbf{E}$ — вектор напряженности электрического поля; $\mathbf{f}_j$ — вектор массовых сил; φ — электрический потенциал; $\alpha, \beta, \zeta, \beta_{dj}, \zeta_d$ — коэффициенты демпфирования; $\mathbf{c}_j^E, \mathbf{e}_j^T, \varepsilon_j^S$ — тензоры упругих констант, пьезомодулей и диэлектрических проницаемостей, индекс j отвечает номеру тела в модели.

При моделировании упругих тел (полоса и поврежденный слой) остается только механическое поле смещений (пьезоконстанты равны нулю), и система (1) принимает вид:

$$\rho_{pk} \ddot{\mathbf{u}} + \alpha_{dj} \rho_j \dot{\mathbf{u}} - \nabla \cdot \boldsymbol{\sigma} = \mathbf{f}_j, \quad \boldsymbol{\sigma} = \mathbf{c}_j^E \cdot (\boldsymbol{\varepsilon} + \beta_{dj} \dot{\boldsymbol{\varepsilon}}), \quad \boldsymbol{\varepsilon} = (\nabla \mathbf{u} + \nabla \mathbf{u}^T) / 2. \quad (2)$$

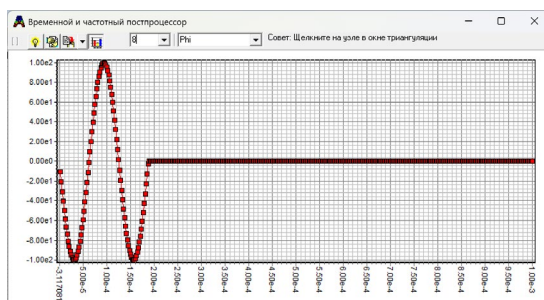
К системе уравнений (1), (2) добавляются механические и электрические граничные условия, соответствующие нулевым механическим напряжениям на внешних границах тел, постоянному по координатам электрическому потенциалу на электродах, нулевой нормальной компоненте вектора электрической индукции на неэлектродированных границах, а также нулевые начальные условия. Для определения электрического потенциала на свободном электроде S_E приемника используется дополнительное условие следующего вида:

$$\int_{S_E} \dot{D}_n ds = 0. \quad (3)$$

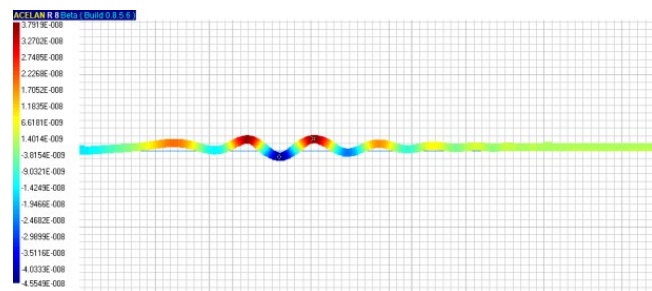
Упругие волны возбуждаются переменным электрическим потенциалом $\varphi = \varphi(t)$ (рис. 2 а) на верхнем электроде датчика (номер 1 на рис. 1).

Конечно-элементная модель. Набор данных для обучения искусственной нейронной сети (ИНС) строится на основе решение прямых задач для полосы с известными параметрами поврежденного состояния. Решение этих нестационарных задач проводится методом конечных элементов (МКЭ) в пакете ACELAN [29] с использованием квадратичных треугольных элементов. Конечно-элементная сетка содержит 5616 элементов и 12 155 узлов. Рисунки 1–3 получены в пакете ACELAN. Рисунки 4–6 получены с использованием библиотеки Matplotlib языка программирования Python на основе результатов расчетов.

На рисунке 2 а представлена зависимость от времени разности потенциалов на датчике (три полуволны синусоиды амплитудой 100 В), которая возбуждает упругую волну в полосе, а на рисунке 2 б распределение вертикального смещения этой волны.



а)



б)

Рис. 2. Зависимость от времени: а — разность потенциалов на актуаторе; б — распределение вертикального смещения

Сравнение электрических потенциалов на приемнике при пористости 10 % и 70 % (рис. 3), рассчитанные с помощью (3), показывает существенные различия как в амплитуде, так и во времени прихода сигнала.

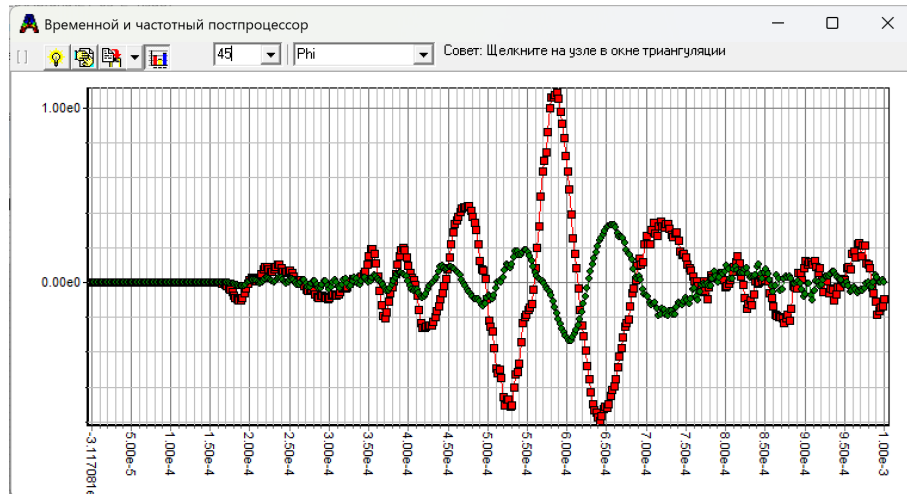


Рис. 3. Зависимости электрического потенциала на сенсоре от времени при 10 % пористости (красная кривая) и 70 % пористости (зеленая кривая)

Эта значительная зависимость измеряемых характеристик от параметров повреждения обеспечивает возможность идентификации пористости и глубины поврежденного слоя.

Генерация данных для обучения нейронной сети. Исходные данные (максимальная амплитуда электрического потенциала на приемнике рис. 1 номер 2 и время ее реализации) состоят из 48-ми точек, полученных из конечно-элементных расчетов: 6 значений глубины и 8 значений пористости.

Таблица 2

Зависимость T — времени в секундах максимальной амплитуды электрического потенциала от параметров повреждения ($\times 10^{-4}$)

h (мм) p (%)	10	20	30	40	50	60	70	80
0,5	5,872	5,865	5,870	5,890	5,92	5,940	5,980	6,000
1	5,805	5,880	5,940	6,000	6,06	6,130	6,180	6,204
1,5	5,804	5,900	5,985	6,100	6,19	6,280	6,340	6,390
2	5,800	5,920	6,030	6,140	6,30	6,448	6,570	6,680
2,5	5,804	5,940	6,050	6,200	6,37	6,590	6,780	6,890
3	5,804	5,940	6,075	6,285	6,52	6,770	6,930	7,160

Таблица 3

Зависимость V — амплитуды электрического потенциала в вольтах от параметров повреждения

h (мм) p (%)	10	20	30	40	50	60	70	80
0,5	1,097	1,065	1,040	0,965	0,845	0,700	0,500	0,296
1	1,092	1,070	1,010	0,890	0,770	0,590	0,405	0,232
1,5	1,070	1,054	0,978	0,870	0,760	0,560	0,370	0,202
2	1,058	1,044	0,96	0,860	0,740	0,532	0,340	0,190
2,5	1,058	1,030	0,935	0,858	0,720	0,515	0,321	0,157
3	1,060	1,030	0,935	0,843	0,720	0,467	0,320	0,155

Для обучения и валидации ИНС на основе таблиц 2 и 3 были сформированы два набора данных. При создании первого набора применялась двумерная сплайн-интерполяция. В обучающем наборе использована кубическая интерполяция, что позволило сформировать плотную обучающую сетку размером $100 \times 100 = 10\,000$ точек в области параметров (p , h). Второй независимый тестовый набор данных размером $200 \times 200 = 40\,000$ точек был получен с применением того же метода интерполяции.

Архитектура нейронной сети. Для обучающего набора данных реализована многослойная нейронная сеть прямого распространения. Архитектура ИНС прямого распространения представлена в таблице 4.

Архитектура ИНС

Слой	Нейроны	Активация
Входной	2	—
Скрытый 1	128	ReLU
Дропаут	20 %	—
Скрытый 2	64	ReLU
Дропаут	20 %	—
Скрытый 3	32	ReLU
Скрытый 4	16	ReLU
Выход (Пористость)	1	Линейная
Выход (Глубина)	1	Линейная

Сеть имеет две выходные ветви (пористость и глубина), разделяющие одни и те же скрытые слои. Слои дропаута (20 %) были добавлены после первых двух скрытых слоев для предотвращения переобучения. Был использован оптимизатор Adam с начальной скоростью обучения 0,001.

Взвешенная функция потерь. Для уменьшения положительной асимметрии, наблюдаемой в начальных прогнозах пористости, была использована взвешенная среднеквадратичная функция потерь для выхода пористости:

$$\mathcal{L}_{porosity} = \frac{1}{N} \sum_{i=0}^N w_i (p_i^{true} - p_i^{pred})^2, w_i = \begin{cases} 2,0 & \text{если } p_i^{true} - p_i^{pred} < 0 \\ 1,0 & \text{в противном случае} \end{cases} \quad (4)$$

Эта функция потерь штрафует завышение прогнозов в два раза больше, чем занижение, эффективно уменьшая положительное смещение в прогнозах.

Результаты исследования. В данном разделе представлены результаты численного эксперимента по обучению и валидации искусственной нейронной сети (ИНС) для идентификации параметров повреждения (пористости p и глубины h поврежденного слоя). Результаты организованы в следующей последовательности: анализ процесса обучения сети, оценка общей производительности, анализ точности в области низкой пористости и проверка единственности решения обратной задачи.

Анализ процесса обучения нейронной сети. Первым этапом численного эксперимента являлось исследование обучения ИНС в зависимости от количества эпох. Прогнозы выполнялись с использованием первого обучающего набора данных и второй архитектуры ИНС (таблица 4). Обучение проводилось до 500 эпох с ранней остановкой и снижением скорости обучения на плато. В процессе обучения значение функции потерь на обучающем наборе данных снизилось с 0,120 до 0,003; ранняя остановка была достигнута приблизительно на 280-й эпохе (рис. 4 а). Функция потерь на валидационном наборе данных достигла минимума к моменту ранней остановки, после чего началось незначительное переобучение, что послужило сигналом для ее активации. Итоговое значение функции потерь на валидационном наборе данных составило 0,0045, что подтверждает хорошую обобщающую способность обученной сети. На рисунке 4 представлены кривые потерь обучения и валидации. Расчеты выполнены с использованием библиотеки Matplotlib языка программирования Python.

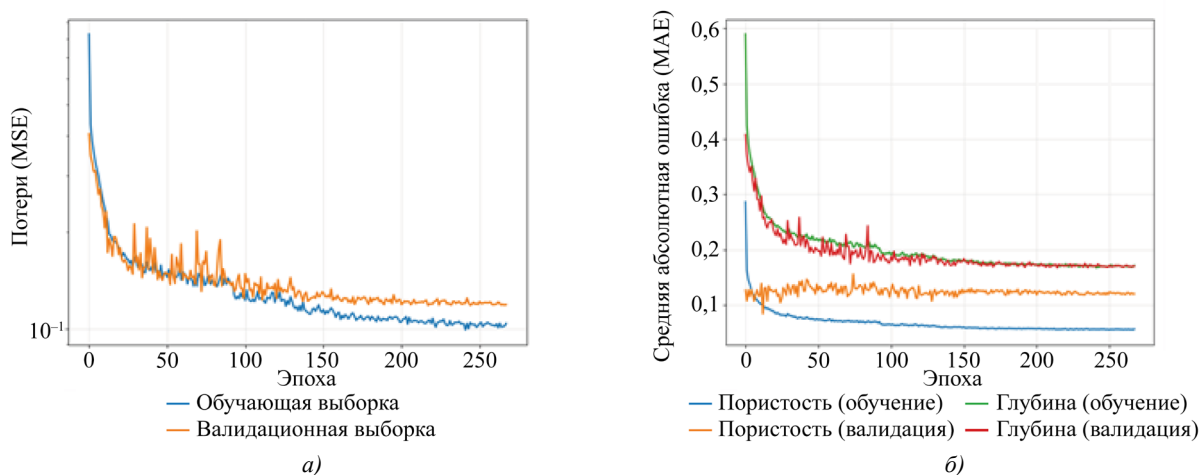


Рис. 4. Кривые потерь обучения и валидации: а — среднеквадратичная ошибка (MSE); б — средняя абсолютная ошибка (MAE) для пористости и глубины

Единственность решения обратной задачи. Инъективность отображения измеренных величин (V , T) в параметры повреждения (p , h) была проверена на независимом тестовом наборе данных из 40 000 точек. Все 40 000 тестовых точек дали уникальные двумерные сигнатуры. Эти результаты эмпирически демонстрируют, что обратная задача имеет единственное решение для всех практически значимых состояний повреждения.

Общая производительность нейронной сети. Обученная нейронная сеть была оценена на независимом тестовом наборе данных из 40 000 точек. В таблице 5 представлены общие показатели производительности.

Таблица 5

Общая производительность нейронной сети

Метрика	Пористость	Глубина
Средняя абсолютная ошибка (MAE)	2,433 %	0,121 мм
Коэффициент детерминации (R^2)	0,977	0,910

На рисунке 5 представлены диаграммы рассеяния предсказанных значений по сравнению с истинными. Отличное выравнивание с диагональной линией демонстрирует точность прогнозов нейронной сети. Расчет выполнен с использованием библиотеки Matplotlib языка программирования Python.

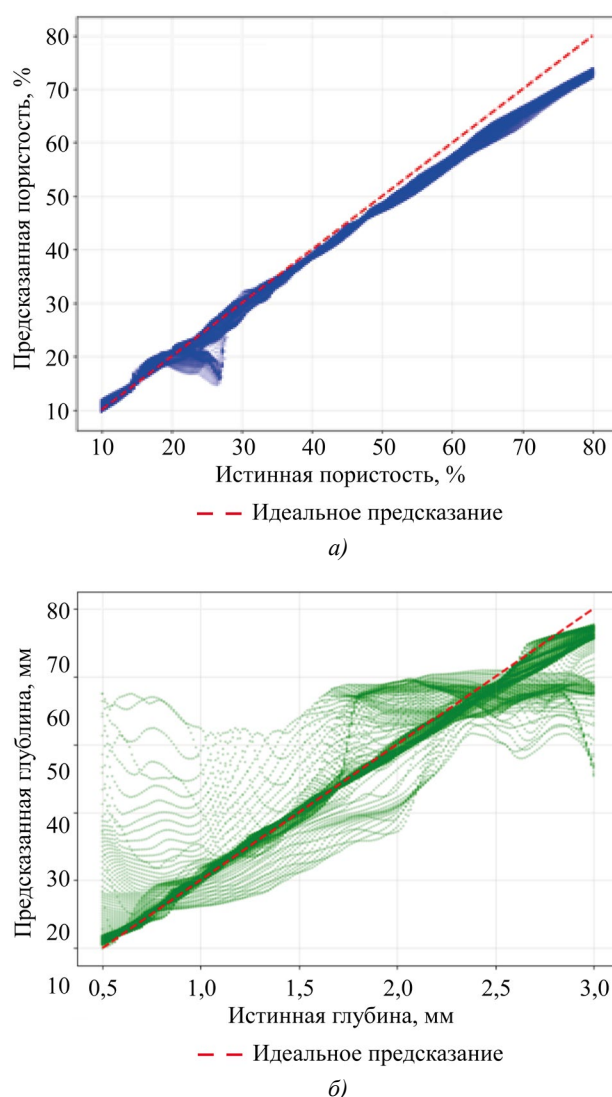


Рис. 5. Прогнозы нейронной сети против истинных значений: *a* — пористость: MAE = 2,433 %, R^2 = 0,977, смещение = –2,191 %; *б* — глубина: MAE = 0,121 мм, R^2 = 0,910, смещение = –0,014 мм

Производительность в области низкой пористости. Ключевым вкладом этой работы является улучшенная производительность в области низкой пористости ($p < 15\%$), где метод пересечения контурных линий поверхностей, задаваемых таблицами 2 и 3, был нестабильным. В таблице 6 представлена производительность нейронной сети для тестовых точек с пористостью менее 15 %, включающих 3000 точек.

Производительность в области низкой пористости

Метрика	Пористость	Глубина
Средняя абсолютная ошибка (MAE)	0,405 %	0,173 мм
Коэффициент детерминации (R^2)	0,865	0,886
Смещение (средняя ошибка)	+0,188%	+0,012 мм

Нейронная сеть достигает отличной точности в области низкой пористости, со средней абсолютной ошибкой всего 0,405 % для пористости и смещением всего + 0,188 %. На рисунке 6 представлено распределение ошибок для тестовых точек с пористостью менее 15 %, подтверждая почти симметричное распределение ошибок. Расчет выполнен с использованием библиотеки Matplotlib языка программирования Python.

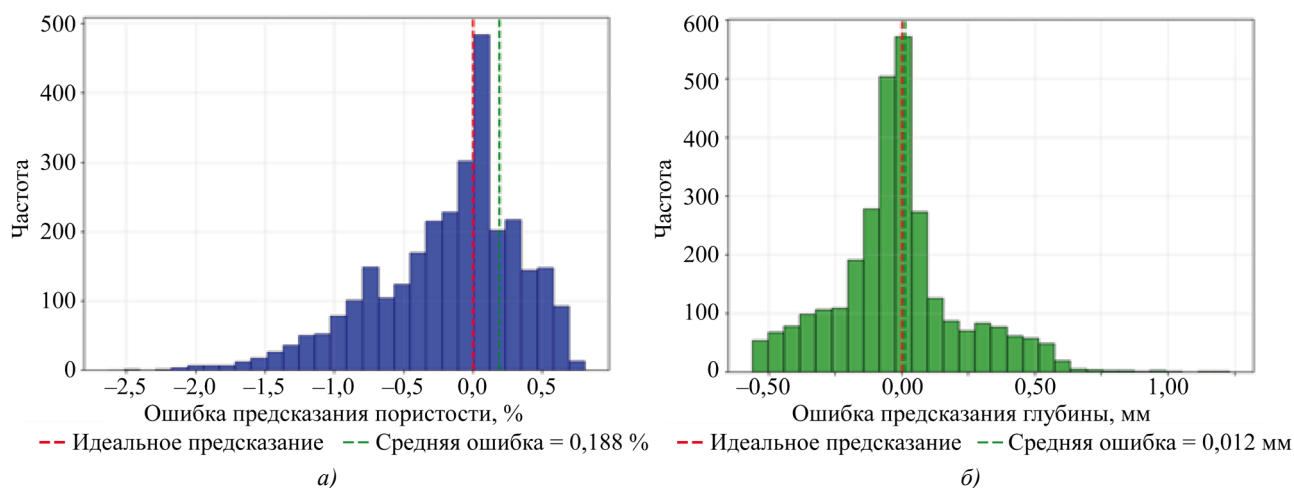


Рис. 6. Распределение ошибок для тестовых точек с пористостью менее 15 %:

a — пористость: MAE = 0,405 %, смещение = 0,188 %; *б* — глубина: MAE = 0,173 мм, смещение = 0,012 мм

Обсуждение. Ключевым результатом настоящей работы является разработка нейросетевой технологии для акустического мониторинга поврежденного состояния протяженных строительных конструкций, которая позволяет автоматически идентифицировать параметры повреждения (пористость p и глубину h поврежденного слоя) на основе анализа нестационарных волн.

Предложенный подход успешно преодолевает фундаментальное ограничение метода пересечения контурных линий, разработанного ранее на основе зависимости максимальной амплитуды электрического потенциала на сенсоре и времени ее достижения от параметров повреждения, который становился нестабильным в области низкой пористости ($p < 15\%$) из-за слабой зависимости амплитуды сигнала от времени. В отличие от него, обученная нейронная сеть (многослойный персептрон с архитектурой 128–64–32–16) демонстрирует устойчивые и точные прогнозы во всем диапазоне значений параметров, включая проблемную область низкой пористости. Это подтверждается численными результатами. В области ($p < 15\%$) сеть достигает MAE = 0,405 % для пористости и MAE = 0,173 мм для глубины, что сопоставимо с точностью в области высокой пористости.

Применение взвешенной функции потерь, штрафующей завышение прогнозов в два раза сильнее, чем занижение, играет эффективную роль в уменьшении положительной асимметрии прогнозов пористости. В области низкой пористости смещение (средняя ошибка) составило всего +0,188 %, что свидетельствует о практически несмещенных оценках, что особенно важно для практических приложений, где завышение степени повреждения может привести к ложным тревогам и неоправданным ремонтным работам.

Все 40 000 тестовых точек дают уникальные двумерные сигнатуры, что эмпирически подтверждает единственность решения обратной задачи и надежность предложенного подхода, а также его пригодность для практического использования. Это свойство отображения $(V, T) \rightarrow (p, h)$ гарантирует, что каждому измеренному сигналу соответствует единственный набор параметров повреждения, что исключает неоднозначность интерпретации результатов мониторинга.

Сравнение полученных результатов с современной литературой показывает, что предложенный подход находится в русле активно развивающихся методов применения нейронных сетей для задач Structural Health Monitoring. В работах [4, 8, 9, 11] показана эффективность глубокого обучения для обработки сигналов акустической эмиссии и ультразвука. В отличие от этих работ, где нейронные сети используются для классификации типов

повреждений или локализации источников, настоящее исследование решает более сложную задачу — количественную идентификацию двух параметров повреждения (пористости и глубины) по двум измеряемым характеристикам сигнала, демонстрируя, что даже при ограниченной входной информации (всего два признака) нейронная сеть способна обеспечить высокую точность прогнозов.

Ключевым преимуществом предложенного подхода является его энергетическая автономность. Применение пьезоэлектрических элементов, одновременно выполняющих функции актуатора и сенсора, позволяет интегрировать систему в конструкцию на этапе ее изготовления. В условиях динамического нагружения эти же элементы работают как пьезоэлектрические генераторы, обеспечивая накопление энергии и делая систему мониторинга полностью самодостаточной — без необходимости использования внешнего источника питания. Данная особенность особенно значима для таких объектов, как элементы мостовых конструкций и подземные сооружения, доступ к которым затруднен, а замена батарей или поддержание сетевого подключения часто являются технически сложными.

Вместе с тем данный подход имеет ряд ограничений, которые необходимо учитывать при его практическом применении. Во-первых, предполагается постоянство пористости по глубине и длине поврежденного слоя. В реальных конструкциях повреждения нередко характеризуются сложной пространственной структурой и неоднородным распределением пористости. Учет таких неоднородностей приводит к формированию обратной задачи существенно более высокой сложности, требующей увеличения числа входных признаков и, вероятно, применения более сложных архитектур нейронных сетей. Во-вторых, исследование выполнено на основе численного моделирования. В связи с этим экспериментальная валидация на реальных бетонных образцах является необходимым следующим этапом. В-третьих, диапазон параметров ограничен: $10\% \leq p \leq 80\%$, $0,05 \text{ мм} \leq h \leq 0,3 \text{ мм}$. Для его расширения может потребоваться дополнительное обучение сети.

Дальнейшие исследования включают несколько направлений. Во-первых, целесообразно использовать всю амплитудно-временную характеристику электрического потенциала на сенсоре, а не только два выделенных признака, в качестве входной информации, а также применять сверточные нейронные сети (CNN) для автоматического извлечения признаков из временных сигналов. Во-вторых, требуется экспериментальная валидация разработанного подхода на лабораторных бетонных образцах с контролируемым искусственным повреждением. В-третьих, перспективной является адаптация метода для элементов сложной геометрии, включая поперечные сечения, характерные для строительных конструкций.

В заключение следует подчеркнуть, что разработанная нейросетевая технология представляет собой удобный инструмент неразрушающего контроля, который может быть реализован в физическом устройстве. Она обеспечивает устойчивое и точное прогнозирование параметров повреждения во всем диапазоне их значений, что подтверждает ее практическую значимость для систем акустического мониторинга протяженных бетонных конструкций. Предложенный подход может быть интегрирован в автоматизированные системы мониторинга состояния конструкций, что позволит своевременно выявлять повреждения и предотвращать критические последствия их развития.

Заключение. В рамках данной работы успешно решена задача автоматического определения поврежденного состояния протяженных строительных конструкций. В качестве целевых параметров рассматривались толщина поврежденного слоя и степень повреждения, характеризующая пористостью материала. Для решения данной задачи была разработана физическая модель устройства мониторинга, состоящая из пьезоэлектрических актуатора и сенсора. Также выбрана дополнительная информация, необходимая для решения обратной геометрической и коэффициентной задачи идентификации параметров поврежденности в конечномерной области.

Разработана математическая и компьютерная модель такого устройства в рамках метода конечных элементов. Расчеты, выполненные на основе данных моделей, показали существенную зависимость максимальной амплитуды электрического потенциала на сенсоре и времени ее достижения от параметров поврежденности. С использованием указанной модели в конечно-элементном пакете ACELAN получены зависимости дополнительной информации от параметров поврежденности. На основе этих зависимостей с помощью кубической интерполяции были сгенерированы два набора данных для обучения нейронной сети: обучающий (10 000 точек) и тестовый (40 000 точек).

Обучение и валидация нейронной сети показывают, что она может быть эффективно использована для решения задачи мониторинга. Обучение проводилось до 500 эпох с применением ранней остановки и снижением скорости обучения при выходе функции потерь на плато; точка ранней остановки была достигнута приблизительно на 280-й эпохе. Таким образом, данная работа предлагает нейросетевое решение обратной задачи идентификации параметров повреждения в протяженных бетонных конструкциях с использованием акустического мониторинга.

Основные выводы

– Обучена нейронная сеть прямого распространения, состоящая из четырех скрытых слоев с 128, 64, 32 и 16 нейронами соответственно, для прогнозирования пористости p и глубины h поврежденного слоя по нормированному времени распространения волны и нормированному электрическому потенциалу. Сеть использует функцию активации ReLU и включает слои дропаута с коэффициентом 20 %.

– При оценке на 40 000 независимых тестовых образцах сеть показала среднюю абсолютную ошибку 2,433 % для пористости и 0,121 мм для глубины с соответствующими коэффициентами детерминации $R^2 = 0,977$ и $R^2 = 0,910$.

– В области низкой пористости ($p < 15\%$), где метод пересечения контурных линий, использованный в предыдущей работе, был нестабильным, нейронная сеть достигает средней абсолютной ошибки 0,405 % для пористости и 0,173 мм для глубины при смещении всего +0,188 %.

– Взвешенная стратегия потерь, при которой завышение прогнозов штрафуются в два раза строже, чем занижение, способствовала уменьшению положительной асимметрии прогнозов пористости.

– Предложенная нейронная сеть решает ключевую проблему, с которой не справлялся метод контурных линий, — обеспечивает стабильные и точные прогнозы во всем диапазоне пористости.

– Все 40 000 тестовых точек дали уникальные двумерные сигнатуры. Это эмпирически подтвердило единственность обратной задачи и продемонстрировало инъективность отображения.

Таким образом, в работе предложены схема устройства и программное обеспечение в виде обученной ИНС, позволяющие в автоматическом режиме осуществлять мониторинг поврежденного состояния. Практическая значимость исследования состоит в разработке удобного инструмента неразрушающего контроля, который может быть реализован в физическом устройстве. Использование пьезоэлектрических элементов в качестве актуатора и сенсора обеспечивает энергетическую автономность системы мониторинга, что особенно важно для труднодоступных участков конструкций.

Предложенный метод был продемонстрирован на простой геометрии — полосе протяженного элемента строительной конструкции. Перспективы дальнейших исследований включают разработку моделей мониторинга для элементов сложной геометрии, в том числе поперечных сечений, характерных для строительных конструкций. Дальнейшая работа может быть сосредоточена на экспериментальной валидации с использованием лабораторных бетонных образцов с контролируемым искусственным повреждением, а также на включении дополнительных данных сенсора, то есть всей амплитудно-временной характеристики электрического потенциала, и применении сверточных нейронных сетей для повышения точности прогнозов.

Список литературы / References

1. Fan Li, Daming Luo, Ditao Niu. Data-Intelligence Driven Methods for Durability, Damage Diagnosis and Performance Prediction of Concrete Structures. *Communications Engineering*. 2025;4:100. <https://doi.org/10.1038/s44172-025-00431-4>
2. Zinno R, Haghsheenas SS, Guido G, Vitale A. Artificial Intelligence and Structural Health Monitoring of Bridges: A Review of the State-of-the-Art. *IEEE Access*. 2022;10:88058–88078. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2022.3199443>
3. Silva-Campillo A, Herreros-Sierra MA, Pérez-Arribas F. Acoustics as a Structural Health Monitoring Tool in Naval and Offshore Structures: A Comprehensive Review. *Applied Sciences*. 2026;16(3):1477. <https://doi.org/10.3390/app16031477>
4. Azimi M, Eslamlou AD, Pekcan G. Data-Driven Structural Health Monitoring and Damage Detection through Deep Learning: State-of-the-Art Review. *Sensors*. 2020;20(10):2778. <https://doi.org/10.3390/s20102778>
5. Altabey WA, Noori M. Artificial-Intelligence-Based Methods for Structural Health Monitoring. *Applied Sciences*. 2022;12(24):12726. <https://doi.org/10.3390/app122412726>
6. Raissi M, Perdikaris P, Karniadakis GE. Physics-Informed Neural Networks: A Deep Learning Framework for Solving Forward and Inverse Problems Involving Nonlinear Partial Differential Equations. *Journal of Computational Physics*. 2019;378:686–707. <https://doi.org/10.1016/j.jcp.2018.10.045>
7. Lee S, Popovics JS. Ultrasonic Defect Detection in a Concrete Slab Assisted by Physics-Informed Neural Networks. *NDT & E International*. 2025;151:103311. <https://doi.org/10.1016/j.ndteint.2024.103311>
8. Yuboo Zhou, Minfei Liang, Xinling Yue. Deep Residual Learning for Acoustic Emission Source Localization in a Steel-Concrete Composite Slab. *Construction and Building Materials*. 2024;411:134220. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.134220>
9. Mukhti JA, Gucunski N, Kee SH. AI-Assisted Ultrasonic Wave Analysis for Automated Classification of Steel Corrosion-Induced Concrete Damage. *Automation in Construction*. 2024;167:105704. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2024.105704>
10. Vitola J, Tibaduiza D, Anaya M, Pozo F. Structural Damage Detection and Classification Based on Machine Learning Algorithms. B: *Proc. 8th European Workshop on Structural Health Monitoring*. Vol. 4. Mayen: NDT.net; 2016. С. 2853–2862. URL: <https://upcommons.upc.edu/server/api/core/bitstreams/523fb364-b6fb-4166-9af2-0fc90192621/content> (дата обращения: 29.06.2026).

11. Zhang T, Mahdi M, Issa M, Xu C, Ozevin D. Experimental Study on Monitoring Damage Progression of Basalt-FRP Reinforced Concrete Slabs Using Acoustic Emission and Machine Learning. *Sensors*. 2023;23(20):8356. <https://doi.org/10.3390/s23208356>
12. Tuan-Khai Nguyen, Zahoor Ahmad, Jong-Muon Kim. A Scheme with Acoustic Emission Hit Removal for the Remaining Useful Life Prediction of Concrete Structures. *Sensors*. 2021;21(22):7761. <https://doi.org/10.3390/s21227761>
13. Yunwoo Lee, Heesoo Kim, Seongi Min, Hyungchul Yoon. Structural Damage Detection Using Deep Learning and FE Model Updating Techniques. *Scientific Reports*. 2023;13:18694. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-46141-9>
14. Zilong Wang, Youngjin Cha. Unsupervised Machine and Deep Learning Methods for Structural Damage Detection: A Comparative Study. *Engineering Reports*. 2025;7(1):e12551. <https://doi.org/10.1002/eng2.12551>
15. Ghosh S, Dan S, Tarafder P. Machine Learning-Enabled Multiscale Modeling Platform for Damage Sensing Digital Twin in Piezoelectric Composite Structures. *Scientific Reports*. 2025;15:6631. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-91196-5>
16. Jiawei Lei, Chengkan Xu, Chaofeng Lü, Qian Feng, Zhang H. A Data-Driven Prediction for Concrete Crack Propagation Path Based on Deep Learning Method. *Case Studies in Construction Materials*. 2024;21:e03883. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2024.e03883>
17. Lingjie Wu, Weiqiang Wang, Chenchu Jiang. Deep Learning-Based Prediction for Time-Dependent Chloride Penetration in Concrete Exposed to Coastal Environment. *Heliyon*. 2023;9(6):e16869. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e16869>
18. Khurshid H, Mohammed BS, Bheel N, Cahyadi WA, Mukhtar H. Study of Factors Affecting the Magnetic Sensing Capability of Shape Memory Alloys for Non-destructive Evaluation of Cracks in Concrete: Using Response Surface Methodology (RSM) and Artificial Neural Network (ANN) Approaches. *Heliyon*. 2024;10(15):e35772. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e35772>
19. Mutalib NAAA, Nor NM, Abdullah S, Arifin A, Saliah SNM, Nujid MM, et al. Magnetic Flux Leakage Signal Response for Determining the Fatigue Life of Reinforced Concrete Beams under Cyclic Loading. *Measurement: Digitalization*. 2026;6:100030. <https://doi.org/10.1016/j.measdig.2026.100030>
20. Abdulridha AA, Alzubaidi L, Alver N. Integration of Artificial Intelligence Techniques with Infrared Thermography for Defect Detection in Concrete Structures: A Systematic Review. *Measurement*. 2026;267:120491. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2026.120491>
21. Ullah M, Plevris V, Mir J, Ahmad A. Image-Based Prediction of Concrete Mechanical Properties through CNN Segmentation and ANN Modeling. *Results in Engineering*. 2026;29:108637. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2025.108637>
22. Nguyen A, Gharehbaghi V, Le NT, Sterling L, Chaudhry UI, Crawford S. ASR Crack Identification in Bridges Using Deep Learning and Texture Analysis. *Structures*. 2023;50:494–507. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2023.02.042>
23. Kondratyeva TN, Tyurina VS, Chepurnenko 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>
24. Pukharensko YuV, Khrenov GM, Klyev SV, Khezhev TA Eshanzada SM. Design of Steel Fiber-Reinforced Concrete for Slip Forming. *Construction Materials and Products*. 2024;7(5):2–3. <https://doi.org/10.58224/2618-7183-2024-7-5-2>
25. Petropavlovskaya VB, Petropavlovskii KS, Novichenkova TB, Klyuev SV, Vasilev YE, Ignatyev AA. Fine-Grained Cement Concrete with Compressed Structure, Modified with Basalt Technogenic Highly Dispersed Powder. *Construction Materials and Products*. 2025;8(4):17–36. <https://doi.org/10.58224/2618-7183-2025-8-4-2>
26. Soloviev AN, Germanchuk MS, Oganessian PA. Applied Theory of Transverse Vibrations of Layered Structure with Polymer Matrices and Inclusions of Porous Piezoceramic Rods Arranged along the Layer. *Advanced Engineering Research (Rostov-on-Don)*. 2026;26(1):2272. <https://doi.org/10.23947/2687-1653-2026-26-1-2272>
27. Kudimova AB, Nadolin DK, Nasedkin AV, Nasedkina AA, Oganessian PA, Soloviev AN. Finite Element Homogenization of Piezocomposites with Isolated Inclusions Using Improved 3-0 Algorithm for Generating Representative Volumes in ACELAN-COMPOS Package. *Materials Physics and Mechanics*. 2020;44(3):392–403. https://doi.org/10.18720/MPM.4432020_10
28. Nasedkin AV, Oganessian PA, Soloviev AN. Analysis of Rosen Type Energy Harvesting Devices from Porous Piezoceramics with Great Longitudinal Piezomodulus. *ZAMM – Journal of Applied Mathematics and Mechanics*. 2021;101(3):e202000129. <https://doi.org/10.1002/zamm.202000129>
29. Belokon AV, Nasedkin AV, Solov'ev AN. New Schemes for the Finite-Element Dynamic Analysis of Piezoelectric Devices. *Journal of Applied Mathematics and Mechanics*. 2002;66(3):481–490. [https://doi.org/10.1016/S0021-8928\(02\)00058-8](https://doi.org/10.1016/S0021-8928(02)00058-8)

Об авторах:

Окбазги Кибреаб Абраха, аспирант кафедры «Теоретическая и прикладная механика» Донского государственного технического университета (Российская Федерация, 344003, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), преподаватель Колледжа науки Эритрейского института технологий (Май-Нэфхи, Эритрея), [ORCID](#), [ScopusID](#), okbazghikibreab@gmail.com

Аркадий Николаевич Соловьев, доктор физико-математических наук, доцент, профессор кафедры «Теоретическая и прикладная механика» Донского государственного технического университета (Российская Федерация, 344003, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), [SPIN-код](#), [ORCID](#), [ScopusID](#), [ResearcherID](#), solovievarc@gmail.com

Заявленный вклад авторов:

О.К. Абраха: проведение исследования, формальный анализ, написание черновика рукописи.

А.Н. Соловьев: разработка концепции, написание рукописи.

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Декларация ИИ: авторы заявляют, что при подготовке текста рукописи не использовались технологии генеративного искусственного интеллекта (ИИ), ИИ не является соавтором публикации, авторство присвоено только физическим лицам, внесшим существенный интеллектуальный вклад в исследование.

About the Authors:

Okbazghi Kibreab Abraha, Postgraduate Student of the Department of Theoretical and Applied Mechanics, Don State Technical University (1, Gagarin Square, Rostov-on-Don, 344003, Russian Federation), Lecturer, College of Science, Eritrea Institute of Technology (Mai Nefhi, Eritrea), [ORCID](#), [ScopusID](#), okbazghikibreab@gmail.com

Arkadiy N. Soloviev, Dr.Sci. (Phys.-Math.), Associate Professor, Professor of the Department of Theoretical and Applied Mechanics, Don State Technical University (1, Gagarin Square, Rostov-on-Don, 344003, Russian Federation), [SPIN-code](#), [ORCID](#), [ScopusID](#), [ResearcherID](#), solovievarc@gmail.com

Claimed Contributorship:

OK Abraha: investigation, formal analysis, writing – original draft preparation.

AN Soloviev: conceptualization, writing.

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

All authors have read and approved the final manuscript.

AI Declaration: the authors declare that generative artificial intelligence (AI) technologies were not used in the preparation of the manuscript, and that AI is not a co-author of the publication: authorship is assigned only to natural persons who have made a substantial intellectual contribution to the research.

Поступила в редакцию / Received 02.07.2026

Поступила после рецензирования / Reviewed 03.08.2026

Принята к публикации / Accepted 24.08.2026

МАШИНОСТРОЕНИЕ И МАШИНОВЕДЕНИЕ

MACHINE BUILDING AND MACHINE SCIENCE



УДК 621.86

Оригинальное эмпирическое исследование

<https://doi.org/10.23947/2687-1653-2026-26-3-2435>

Контроль технического состояния подъемных сооружений и оборудования с использованием искусственных нейронных систем

Р.В. Хван , А.А. Короткий 

Донской государственный технический университет, г. Ростов-на-Дону,
Российская Федерация, <https://ror.org/00x5je630>

✉ khvanroman@yandex.ru

EDN: PSBRHA

Аннотация

Введение. Федеральные нормы и правила в области промышленной безопасности регламентируют порядок проведения оценки технического состояния указанных технических устройств и сопутствующего оборудования. Однако данные регуляторные требования предусматривают проведение дискретного анализа дефектов отдельных узлов и деталей грузоподъемных машин. Подобный подход не всегда обеспечивает требуемую точность и эффективность при диагностировании общего состояния оборудования, так как разнообразные сочетания дефектов в многочисленных конструктивных элементах предопределяют различную степень их совокупного износа. Это обусловлено тем, что в ходе долговременной эксплуатации составные узлы и детали механизмов подвергаются неравномерному деструктивному воздействию, приводящему к вариативности степени их разрушения. В настоящем исследовании предлагается сформировать комплекс научно-технических мер, направленных на повышение эксплуатационной надежности как самих грузоподъемных машин, так и сопряженного оборудования, посредством интеграции современных интеллектуальных алгоритмов. Цель работы — разработка интеллектуальной системы поддержки принятия решений, предназначенной для комплексной интегральной оценки технического состояния подъемных сооружений.

Материалы и методы. Для достижения поставленной цели были разработаны три архитектуры искусственных нейронных сетей. Первая модель характеризуется пятислойной структурой: первый — входной слой включает восемь нейронов, соответствующих аналогичному числу браковочных показателей элементов подъемных сооружений, таких как дефекты ходовой части, тормозной системы, канатно-блочной системы и грузового крюка. Три последующих скрытых слоя содержат по восемь нейронов каждый, обеспечивая процесс обучения и фиксацию промежуточных результатов. Выходной слой состоит из трех нейронов, каждый из которых характеризует определенный класс технического состояния исследуемого объекта. Вторая нейронная сеть имеет аналогичную конфигурацию, за исключением входного слоя, в который дополнительно включено девять нейронов, соответствующих показателям браковки несущих металлоконструкций подъемных сооружений. Входной слой третьей модели содержит двадцать девять нейронов. Подобная структура позволяет комплексно оценивать состояние оборудования по всей совокупности браковочных показателей. Практическая реализация разработанных моделей выполнена в среде программирования Python с использованием библиотеки машинного обучения Scikit-learn. Тестирование работоспособности и эффективности разработанных сетей проводилось на десяти независимых выборках по критериям их производительности и доверительным интервалам оценки состояния технических устройств.

Результаты исследования. Производительность разработанных моделей в ходе тестирования составила 100 %, то есть каждая из трех нейросетевых структур безошибочно классифицировала состояние подъемных сооружений во всех десяти тестовых сценариях. При этом доверительный уровень выносимого суждения возрастал по мере масштабирования числа входных параметров сети в диапазоне от 0,628 до 0,705.

Обсуждение. Представленные данные демонстрируют выраженное влияние архитектуры искусственной нейросети на прецизионность диагностирования подъемных сооружений. Ключевым результатом является установление численной зависимости между комбинациями браковочных критериев и результирующим классом со-

стояния посредством анализа уровней активации нейронов выходного слоя, выступающих количественной мерой достоверности принимаемого моделью решения. Полученные выводы коррелируют с предшествующими исследованиями в области приложения методов машинного обучения к технической диагностике. Специфика предложенного подхода состоит в интегральной оценке общего состояния без детального математического моделирования локальных физических процессов, что обуславливает его эффективность в условиях дефицита априорной информации об эксплуатационных режимах. К числу ограничений работы следует отнести относительно небольшой объем выборки и определенную субъективность экспертной разметки. Возможные погрешности обусловлены риском переобучения нейросети на малых массивах обучающей информации.

Заключение. Предложенная интеллектуальная система разработана с учетом практического опыта эксплуатации подъемных машин, анализа накопленных статистических данных и требований действующих отраслевых стандартов. Научные результаты расширяют представление о потенциале применения алгоритмов искусственного интеллекта для обеспечения техногенной безопасности сложных технических объектов. Внедрение подобных систем позволит инженерно-техническому персоналу, не обладающему обширным практическим опытом натурного обследования конструкций, принимать квалифицированные и обоснованные решения относительно возможности продолжения безопасной эксплуатации оборудования.

Ключевые слова: подъемные сооружения, искусственные нейронные сети, степень повреждения, браковочные показатели, комбинация дефектов, оценка технического состояния

Благодарности. Авторы выражают искреннюю благодарность коллективу ООО ИКЦ «Мысль» НГТУ г. Новочеркасска за предоставленную возможность использовать данные экспертизы промышленной безопасности подъемных сооружений, а также за доступ к статистической базе данных типовых повреждений кранов.

Для цитирования. Хван Р.В., Короткий А.А. Контроль технического состояния подъемных сооружений и оборудования с использованием искусственных нейронных систем. *Advanced Engineering Research (Rostov-on-Don)*. 2026;26(3):2435. <https://doi.org/10.23947/2687-1653-2026-26-3-2435>

Original Empirical Research

Technical Condition Monitoring of Lifting Structures and Equipment Using Artificial Neural Systems

Roman V. Khvan , Anatoly A. Korotky 

Don State Technical University, Rostov-on-Don, Russian Federation, <https://ror.org/00x5je630>

 khvanroman@yandex.ru

Abstract

Introduction. Federal industrial safety standards and regulations establish the requirements for the technical condition assessment of the said engineering devices and associated equipment. However, these regulatory frameworks require a discrete-level defect analysis of composite nodes and parts of load-lifting machinery. This approach does not always ensure the required accuracy and objectivity in monitoring the overall condition of equipment, as various combinations of defects in numerous structural components determine varying degrees of their overall wear. This is due to the fact that, during long-term operation, the components and parts of the mechanisms are subject to uneven destructive stress resulting in variability in the degree of their damage. The present work proposes a combination of scientific and technical measures to improve the operational reliability of both lifting machines and associated equipment through the integration of modern intelligent algorithms. The research objective of the study is to develop an intelligent decision support system designed for a comprehensive, integrated assessment of the operating conditions of lifting structures.

Materials and Methods. To achieve this objective, three models of artificial neural networks have been developed. The first model contains five layers: the first input layer includes eight neurons corresponding to the same number of rejection indicators of lifting structure components, such as defects in the undercarriage, braking system, rope-and-pulley system, and load hook. The three subsequent hidden layers contain eight neurons each. They are responsible for the learning process of the network and provide recording of intermediate results. The output layer consists of three neurons, each of which characterizes a certain class of technical condition of the object under study. The second neural network has a similar configuration, except for the input layer, which additionally includes nine neurons corresponding to the rejection indicators of the supporting metal structures of lifting facilities. The input layer of the third model contains twenty-nine neurons. This structure allows for a comprehensive assessment of equipment condition across a full range of rejection indicators. The practical implementation of the developed models was performed in the Python programming environment using the Scikit-learn machine learning library. Testing of the performance and efficiency of the developed

networks was carried out on ten independent samples according to their performance criteria and confidence intervals for assessing the state of engineering devices.

Results. The performance of the developed models under testing was 100%, meaning each of the three neural network structures accurately classified the conditions of the lifting structures in all ten test scenarios. Moreover, the confidence level of the judgments made increased as the number of network input parameters was scaled in the range from 0.628 to 0.705.

Discussion. The presented data demonstrate the significant impact of the artificial neural network architecture on the precision of lifting structure diagnostics. The key result is the establishment of a numerical relationship between combinations of rejection criteria and the resulting condition class through the analysis of the activation levels of output layer neurons, which serve as a quantitative measure of the reliability of the decision made by the model. The findings correlate with previous research in the field of applying machine learning methods to technical diagnostics. The specificity of the proposed approach is in the integrated assessment of the overall condition without detailed mathematical modeling of local physical processes, which determines its efficiency under conditions of limited a priori information about operational modes. Limitations of the work include a relatively small sample size and a certain subjectivity of expert marking. Possible errors are due to the risk of retraining the neural network on small arrays of training information.

Conclusion. The proposed intelligent system is developed taking into account practical experience in operating lifting machines, analysis of accumulated statistical data, and the requirements of current industry standards. Scientific results expand the understanding of the potential of using artificial intelligence algorithms to ensure the technological safety of complex technical objects. The implementation of such systems will allow engineering and technical personnel who do not have extensive practical experience in on-site inspection of structures to make qualified and informed decisions regarding the possibility of continuing the safe operation of equipment.

Keywords: lifting structures, artificial neural networks, degree of damage, rejection indicators, combination of defects, technical condition assessment

Acknowledgments. The authors would like to thank the staff of Scientific and Technical Center “Mysl”, Novocherkassk State Technical University, for the opportunity to use the data of the industrial safety examination of lifting structures, as well as for access to the statistical database of typical crane damage.

For Citation. Khvan RV, Korotky AA. Technical Condition Monitoring of Lifting Structures and Equipment Using Artificial Neural Systems. *Advanced Engineering Research (Rostov-on-Don)*. 2026;26(3):2435. <https://doi.org/10.23947/2687-1653-2026-26-3-2435>

Введение. В соответствии с Приказом Ростехнадзора¹ (далее — ФНП) определены и утверждены браковочные показатели для различных элементов подъемных сооружений (далее — ПС): ходовой части, тормозной и канатно-блочной систем, несущих металлоконструкций, а также болтовых и заклепочных соединений. Тем не менее принятая в настоящее время методология предусматривает изолированную оценку каждого повреждения вне связи с остальными. В реальных условиях эксплуатации конструктивные узлы ПС подвергаются неравномерному износу, вследствие чего множественные сочетания деструктивных факторов способны вызывать синергетический эффект, существенно снижающий фактический запас прочности по сравнению с суммарным воздействием обособленных дефектов [1]. В качестве примера можно привести сочетание остаточного прогиба пролетных балок, составившего 54 мм при нормативном пределе 59,5 мм, и увеличенной доли рабочих циклов с массой груза свыше 0,75Q (5 % вместо регламентированных паспортом 2 %). Подобная совокупность условий обусловила сокращение периода безопасного функционирования технического устройства с расчетных 7 до 1 года, однако методика количественной оценки указанного взаимного влияния в действующих нормативных документах полностью отсутствует. Применяемый сегодня подход не обеспечивает возможности численного учета интерференции разнородных повреждений. Это приводит к возникновению неопределенности при установлении сроков проведения очередного технического освидетельствования — выражающейся либо в избыточной периодичности проверок, либо, что гораздо опаснее, в несвоевременном обнаружении критических состояний оборудования. Описанный недостаток приобретает особую критичность применительно к механизмам, выработавшим нормативный ресурс, поскольку в данном случае даже незначительные на первый взгляд дефекты в своей совокупности способны инициировать катастрофические последствия [2].

Анализ данных, полученных при изучении 50 заключений экспертизы промышленной безопасности грузоподъемных кранов различных типов (башенных, мостовых, козловых, а также подвесных однобалочных), выполненных за 2024–2025 годы, свидетельствует о системном характере проблем, связанных с адекватной оценкой

¹ Об утверждении федеральных норм и правил в области промышленной безопасности «Правила безопасности опасных производственных объектов, на которых используются подъемные сооружения»: Приказ Ростехнадзора от 26.11.2020 №461. URL: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_373321/ (дата обращения: 29.06.2026).

технического состояния ПС [3]. В числе наиболее распространенных деструктивных факторов выделяются: накопление усталостных повреждений металла при циклическом нагружении (36 % от общего объема зарегистрированных нарушений), несоответствие фактического распределения нагрузок нормативным паспортным параметрам (25 %), износ элементов канатно-блочной системы (17 %), а также неисправности гидравлического оборудования (11 %). Систематическим явлением выступает превышение установленной доли рабочих циклов с грузом, превышающим 0,75Q, при эксплуатации машин со сроком службы более 30 лет. В условиях формального отсутствия повреждений, выявляемых методами визуально-измерительного контроля, данное обстоятельство влечет за собой сокращение назначенного периода надежной эксплуатации до 1–2 лет вместо потенциально возможных 3–7 лет. В 27 % рассмотренных случаев безопасный период функционирования был ограничен 1 годом при отсутствии очевидных дефектов несущих систем металлоконструкций, что подтверждает недостаточную репрезентативность применяемых методологий локального анализа [4].

Исследование статистических данных по аварийности и производственному травматизму указывает на то, что ключевыми факторами риска выступают неудовлетворительное качество технического обслуживания, диагностирования и экспертизы промышленной безопасности (обусловленное физическим и моральным износом парка оборудования), прогрессирование дефектов ввиду их несвоевременного обнаружения, а также грубые нарушения производственной и трудовой дисциплины [5]. Типичным примером подобного развития событий служит инцидент с башенным краном КБ-515, при котором смещение и последующий выход металлического пальца крепления стреловых секций в сочетании с неблагоприятными метеорологическими факторами вызвали разрушение соединительного узла и падение стрелы на строящийся объект. Непосредственной причиной произошедшего послужил комплекс взаимосвязанных обстоятельств: разрушение удерживающего буртика пальца, недостаточная эффективность производственного контроля и систематическое невыполнение персоналом должностных инструкций. Локальная оценка износа крепежного элемента без учета его взаимодействия со смежными конструктивными узлами и без детального анализа фактических режимов нагружения крана не позволила своевременно спрогнозировать возникновение предаварийной ситуации.

Альтернативный научно-методический подход, базирующийся на применении аппарата нечеткой логики, изложен в исследовании Э.К. Аблязова и К.А. Аблязова применительно к оценке технического состояния портового подъемно-транспортного оборудования. Предложенный метод ориентирован на функционирование в условиях высокого уровня неопределенности, однако область его внедрения ограничена специфическим типом машин [6].

При этом вне рамок указанных исследований остается задача комплексного одновременного учета разнородных повреждений ключевых узлов грузоподъемных машин, включая ходовую часть, тормозную и канатно-блочную системы, несущие металлоконструкции, а также разъемные и неразъемные соединения. Частные методологические решения, ориентированные, в частности, на прогнозирование потребности в ремонтных воздействиях по комплексу диагностируемых параметров с использованием искусственных нейронных сетей (ИНС), разработаны для авиационной техники [7]. Тем не менее их адаптация к специфическим условиям эксплуатации подъемных сооружений и к регламентированной ФНП² номенклатуре критериев браковки до настоящего времени не проводилась.

Методы нейросетевой диагностики находят активное развитие и в смежных отраслях машиностроительного комплекса. Так, в работе [8] представлен алгоритм обработки диагностических параметров авиационных газотурбинных установок на базе многослойных архитектур. В публикации [9] исследована перспективность интеграции ИНС для самодиагностики двигателей внутреннего сгорания при отключении рабочих цилиндров. Авторами исследования [10] осуществлен анализ надежности гидравлического привода методами нейросетевого моделирования. В исследовании [11] предложено научно обоснованное решение по повышению качества программного обеспечения технических объектов благодаря использованию нейросетевых суррогатов. Перечисленные работы убедительно доказывают высокую эффективность применения нейросетевого аппарата для мониторинга сложных дискретных систем, однако они не ориентированы на решение системной задачи интегральной оценки технического состояния ПС на основе сопоставления всего спектра браковочных критериев.

Таким образом, научный обзор профильной литературы и обобщение результатов экспертиз промышленной безопасности позволяют констатировать отсутствие комплексных интеллектуальных систем поддержки принятия решений, способных оценивать интегральное состояние ПС с учетом взаимного влияния дефектов различной физической природы. В настоящее время не созданы математические нейросетевые модели, охватывающие весь спектр установленных ФНП³ браковочных критериев и обеспечивающие количественное определение достоверности классификационных решений. Существующая практика назначения остаточного ресурса, базирующаяся на изолированной оценке повреждений, не учитывает их синергетические эффекты, что крайне опасно при эксплуатации грузоподъемных машин со значительной наработкой.

² Там же. С. 10–11.

³ Там же. С. 20–21.

Цель данной работы — разработка интеллектуальной системы поддержки принятия решений, предназначенной для комплексной оценки технического состояния грузоподъемных ПС по совокупности нормативных браковочных параметров, установленных ФНП⁴, с использованием механизмов искусственных нейронных сетей.

Для достижения поставленной цели решались следующие задачи:

- систематизация браковочных показателей элементов ПС (ходовой части, тормозной и канатно-блочной систем, металлоконструкций, болтовых и заклепочных соединений) согласно нормативным требованиям и последующее определение структуры входного вектора параметров для нейросетевого анализа;
- разработка трех топологий искусственных нейронных сетей с различным числом входных нейронов (8, 17 и 29 соответственно), обеспечивающих поэтапный учет расширяющейся номенклатуры дефектов — от локальных элементов ПС до сложных несущих систем и соединений;
- формирование представительных обучающих и тестовых выборок на основе верифицированных данных экспертиз промышленной безопасности, подготовленных аттестованными экспертами, с дифференциацией технического состояния по трем основным классам (работоспособное, ограниченно работоспособное, предельное);
- проведение процедур обучения и верификации созданных нейросетевых моделей с оценкой метрик точности классификации и доверительных интервалов принимаемых рекомендаций;
- установление закономерностей влияния размерности пространства входных параметров на верифицируемость оценки технического состояния ПС, а также определение перспектив интеграции разработанных моделей в практику экспертной деятельности в качестве систем поддержки принятия решений.

Материалы и методы. Исходными данными для исследования послужили экспертные заключения о промышленной безопасности 50 грузоподъемных кранов различных типов, подготовленные сотрудниками аккредитованной организации ООО ИКЦ «Мысль» при НГТУ. Каждый отчетный документ содержит акты визуального и измерительного контроля несущих металлоконструкций, протоколы наладки и испытаний приборов безопасности, результаты статических и динамических испытаний, а также ведомости выявленных дефектов. Федеральными нормами и правилами⁵ для каждого диагностического признака определены предельно допустимые величины, превышение которых влечет за собой отбраковку конструктивного элемента либо ограничение последующей эксплуатации оборудования. На основе упомянутых показателей сформированы структуры входных слоев трех проектируемых искусственных нейросетевых моделей, содержащих 8 (x_1 – x_8), 17 (x_1 – x_{17}) и 29 (x_1 – x_{29}) нейронов соответственно.

Визуальный и измерительный контроль осуществлялся с применением следующего комплекта приборов и инструментов: линейка металлическая измерительная 500 мм (цена деления 1 мм); штангенциркуль типа ШЦ-1-125 (диапазон измерений до 125 мм, погрешность $\pm 0,05$ мм); лупы измерительные с увеличением $6\times$ и $10\times$; нивелир оптический GEOBOX N7-36 (точность нивелирования 1 мм/м); шаблон сварщика универсальный УШС-3 и шаблон Ушерова-Маршака; дальномер лазерный Disto-5M (погрешность ± 1 мм); набор щупов №2 (толщина 0,05–1,00 мм); шаблоны радиусные измерительные №1 (R 1–6 мм) и №3 (R 7–25 мм); люксметр Testo 545. Освещенность контролируемых зон составляла не менее 300 лк, а пороговая чувствительность контроля — не хуже 0,15 мм. Весь комплекс используемых средств измерений имел действующие свидетельства о поверке.

В соответствии с требованиями ФНП⁶ оценке подвергались следующие параметры: толщина реборды ходового колеса (мм), диаметр поверхности катания колеса (мм), разность диаметров сопряженных колес (%), износ ручья блока (% от первоначального радиуса), величина выработки ручья барабана (мм), износ зева грузового крюка (% от высоты исходного сечения), износ обода тормозного шкива (% от его толщины), истирание фрикционной накладки (% от толщины); остаточный прогиб пролетных балок (мм), остаточная деформация стержней ферменных конструкций (мм), глубина местных вмятин трубчатых элементов (мм), деформация полок уголков и швеллеров (мм); количество дефектных болтов и заклепок (шт.), зазоры в узловых соединениях (мм), глубина коррозионного поражения металлоконструкций (мм).

Из актов визуального и измерительного контроля для каждого грузоподъемного крана извлекались фактические величины контролируемых параметров. На их основе рассчитывалось отношение фактического показателя к соответствующему предельно допустимому уровню, установленному ФНП⁷, выраженное в процентах. Например, для технического устройства с остаточным прогибом 54 мм при нормативном ограничении в 59,5 мм нормированная входная величина составляет $54/59,5 \times 100 \% = 90,8 \%$. Таким образом, были математически сформированы 29 входных признаков, варьирующих в диапазоне от 0 % (дефект полностью отсутствует) до 100 % (достигнут критический браковочный порог).

⁴ Там же. С. 24–25.

⁵ Там же. С. 27–28.

⁶ Там же. С. 72–73.

⁷ Там же. С. 75–78.

Три специалиста в области промышленной безопасности (обладающие стажем практической работы не менее 10 лет и действующими квалификационными удостоверениями) независимо друг от друга сопоставили каждому из 40 наборов данных один из трех классов технического состояния. В своей оценке они руководствовались требованиями ФНП⁸ и накопленным опытом: класс 1 — работоспособное состояние (период до следующего обследования — 3 года); класс 2 — ограниченно работоспособное (период — 1 год); класс 3 — предельное состояние (эксплуатация технического устройства запрещена). Процедура классификации выполнялась экспертами обособленно, исходные сведения они получали в электронном виде в формате таблиц Excel. Возникавшие расхождения в оценках (составившие менее 10 % от общего объема выборки) устранялись в ходе совместного обсуждения коллегиальным методом консенсуса [12]. Согласованность полученных результатов верифицирована по коэффициенту конкордации Кендалла: $W = 0,87, p < 0,01$.

Из общего массива, включающего 40 наборов данных, методом стратифицированного случайного отбора выделено 30 структурных единиц для обучения и 10 — для тестирования, с сохранением пропорционального соотношения классов. При исследовании каждой из трех предложенных архитектур применялись идентичные обучающие и тестовые множества с соответствующей мерностью входного вектора параметров [13].

В ходе работы были спроектированы три модели многослойного перцептрона с использованием класса MLPClassifier программной библиотеки Scikit-learn (версия 1.0.2). Каждая из данных структур содержит три скрытых слоя по 8 нейронов в каждом со встроенной активационной функцией ReLU, а также выходной слой, состоящий из 3 нейронов с функцией Softmax.

Первая модель (рис. 1) характеризуется наличием входного слоя, состоящего из 8 нейронов, которые соответствуют ключевым браковочным характеристикам ходовой части [14], тормозной и канатно-блочной систем, а также грузового крюка (x_1 – x_8).

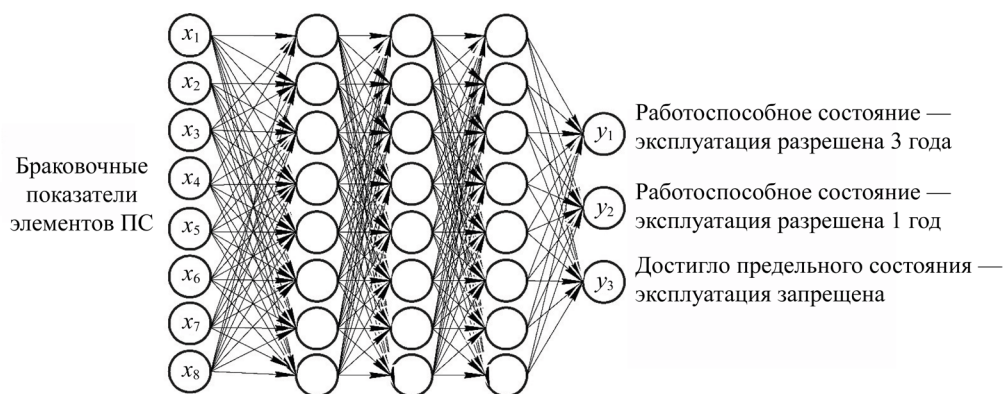


Рис. 1. ИНС оценки технического состояния ПС по комбинации браковочных показателей элементов ПС

Вторая модель (рис. 2) имеет входной слой из 17 нейронов, включающий, помимо x_1 – x_8 , дополнительные 9 нейронов для браковочных показателей несущих металлоконструкций (x_9 – x_{17}).

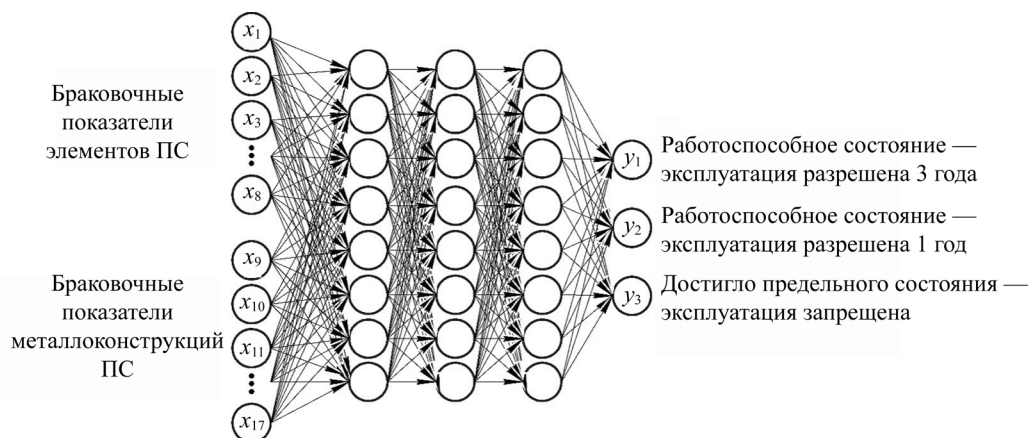


Рис. 2. ИНС для контроля технического состояния ПС с учетом элементов и металлоконструкций ПС

⁸ Там же. С. 79–80.

Третья модель (рис. 3) содержит входной слой из 29 нейронов, соответствующих всем браковочным показателям X_1 – X_{29} , включая дефекты болтовых и заклепочных соединений.

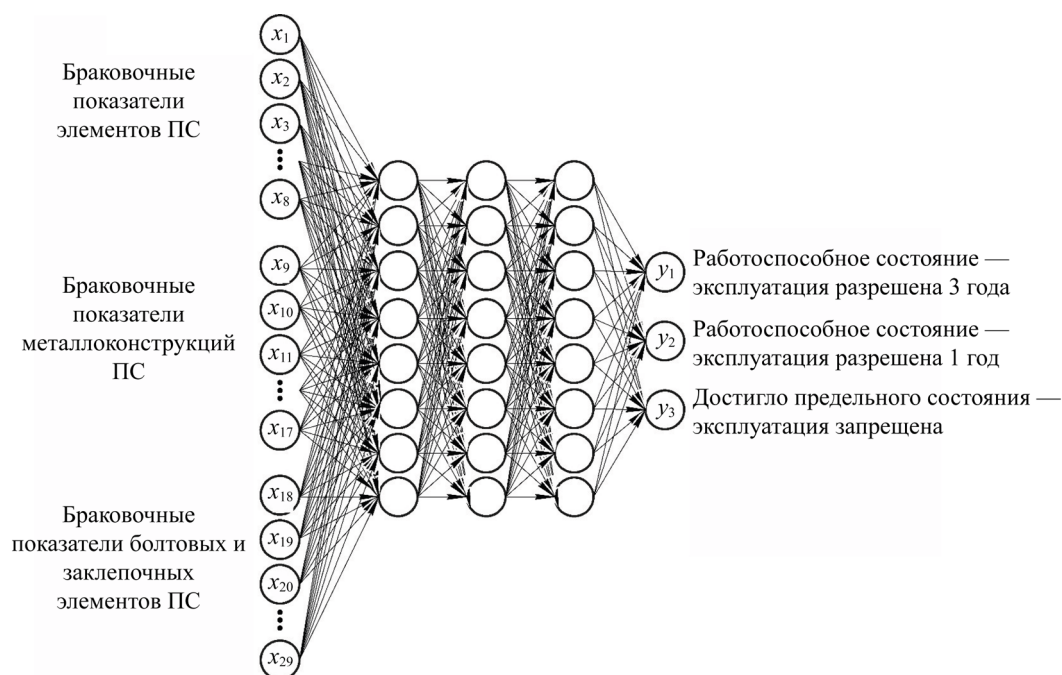


Рис. 3. ИНС для оценки технического состояния ПС, учитывающая комбинацию 29 различных дефектов

Начальные веса инициализированы случайным образом (параметр `random_state = 42` для воспроизводимости). Язык программирования — Python 3.9. Основные библиотеки: `pandas` (1.4.0) и `openpyxl` (3.0.9) для работы с Excel, `sklearn` (1.0.2) для построения и обучения моделей. Входные данные нормализованы методом `MinMaxScaler` к диапазону $[0, 1]$. Параметры обучения: оптимизатор — `Adam`; скорость обучения — 0,001 (по умолчанию); количество эпох — 2000; размер мини-пакета — 10 (соответствует объёму обучающей выборки). Обучение выполнено на персональном компьютере с процессором Intel Core i7-10750H (2,6 ГГц), RAM 16 ГБ, ОС Windows 10 Pro. Время обучения каждой модели составило менее 5 секунд.

Результаты исследования. Обучающие данные загружены из файла Excel, структура которого соответствует заданным требованиям (таблица 1).

Таблица 1

Обучающие выборки (представлены частично) ИНС (x_1 – x_8)

№ п/п	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	x_6	x_7	x_8	y
1	15	32	0	0	22	0	0	0	1
2	31	19	0	61	0	3	0	23	2
3	0	39	0	28	0	0	32	12	2
4	0	0	0	0	9	4	0	0	1
5	79	16	21	16	0	0	0	60	2
6	0	13	0	0	5	0	25	0	1
7	21	33	45	17	0	40	0	0	2
8	70	0	67	0	0	8	0	84	3
9	0	0	15	0	0	0	0	0	1
10	81	0	0	0	0	75	0	0	2
...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
30	45	10	75	0	20	0	0	1	2

Результатом работы ИНС является правильно определенное техническое состояние ПС [15]. Критерием правильности в данном случае является мнение группы экспертов и специалистов по оценке соответствия подъемных сооружений требованиям промышленной безопасности. В таблице 2 представлены уровни активации каждого из трех нейронов выходного слоя. Уровень активации нейрона выходного слоя отражает степень уверенности ИНС в определении технического состояния ПС [16]. Сумма активаций трех нейронов составляет единицу. Нейрон с наивысшим уровнем активации считается «победившим», что определяет окончательное техническое состояние ПС, определенное ИНС [17].

Таблица 2

Уровни активации нейронов выходного слоя (x_1 – x_8)

Выборка (тест)	Состояние ПС – целевая	Состояние ПС – выход	Состояние ПС – 1 (доверительный уровень)	Состояние ПС – 2 (доверительный уровень)	Состояние ПС – 3 (доверительный уровень)
1	2	2	0,22	0,52	0,26
2	2	2	0,42	0,54	0,04
3	1	1	0,67	0,21	0,12
4	2	2	0,11	0,73	0,16
5	3	3	0,07	0,23	0,70
6	2	2	0,14	0,53	0,33
7	1	1	0,65	0,21	0,14
8	2	2	0,41	0,53	0,06
9	1	1	0,80	0,11	0,09
10	1	1	0,61	0,28	0,11

В тестовых выборках целевое значение технического состояния было заранее определено экспертным методом. ИНС правильно определили техническое состояние ПС [18] в каждой тестовой выборке. При этом среднее значение доверительного уровня определения технического состояния ПС составило 0,628.

Далее в таблице 3 представлены 30 обучающих выборок по девяти нейронам, соответствующим браковочным показателям металлоконструкций ПС (x_9 – x_{17} из таблицы 1). При обучении нейронной сети эти выборки были добавлены к выборкам из таблицы 1. То есть сеть была переобучена с включением дополнительных параметров.

Таблица 3

Обучающие выборки (представлены частично) ИНС (x_9 – x_{17})

№ п/п	x_9	x_{10}	x_{11}	x_{12}	x_{13}	x_{14}	x_{15}	x_{16}	x_{17}	y
1	18	0	0	0	29	0	20	0	0	1
2	0	0	14	5	20	33	0	14	5	2
3	0	0	16	0	0	0	0	26	0	2
4	0	14	16	0	7	0	13	16	0	1
5	0	0	35	49	0	0	0	35	49	3
6	0	0	0	32	0	0	0	0	32	1
7	12	0	0	0	0	16	0	0	0	2
8	0	5	0	34	0	12	23	0	34	2
9	0	0	4	35	0	0	8	4	35	1
10	52	0	57	15	60	0	24	57	15	3
...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
30	0	0	0	55	0	12	0	0	55	2

Далее вновь обученная ИНС была проверена на тестовых выборках. Однако во входной слой тестовых выборок были также включены дополнительные параметры, как представлено на рис. 2. Доверительные уровни оценки технического состояния ПС занесены в таблицу 4.

Таблица 4

Уровни активации нейронов выходного слоя ИНС (x_9 – x_{17})

Выборка (тест)	Состояние ПС – Целевая	Состояние ПС – Выход	Состояние ПС – 1 (доверительный уровень)	Состояние ПС – 2 (доверительный уровень)	Состояние ПС – 3 (доверительный уровень)
1	2	2	0,18	0,58	0,24
2	2	2	0,33	0,64	0,03
3	1	1	0,69	0,21	0,1
4	2	2	0,1	0,72	0,18
5	3	3	0,06	0,23	0,71

6	3	3	0,09	0,3	0,61
7	1	1	0,65	0,21	0,14
8	2	2	0,41	0,53	0,06
9	1	1	0,86	0,10	0,04
10	2	2	0,37	0,59	0,04

ИНС, в которую были добавлены 9 нейронов, отвечающих за дефекты несущих металлоконструкций ПС, также корректно оценила техническое состояние в каждой из тестовых выборок, при этом доверительный уровень повысился с 0,628 до 0,658.

Для проверки работы ИНС, модель которой представлена на рис. 3, было подготовлено еще 30 обучающих выборок (таблица 5). Данные выборки включали браковочные показатели болтовых и заклепочных элементов ПС.

Таблица 5

Обучающие выборки (представлены частично) ИНС ($x_{18} - x_{29}$)

№ п/п	x_{18}	x_{19}	x_{20}	x_{21}	x_{22}	x_{23}	x_{24}	x_{25}	x_{26}	x_{27}	x_{28}	x_{29}	y
1	0	5	0	26	0	0	10	0	0	0	0	0	1
2	0	0	0	0	0	0	0	24	0	6	5	0	2
3	0	0	50	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2
4	48	0	0	0	73	0	0	0	0	0	23	0	2
5	57	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	22	3
6	0	14	17	0	0	0	39	0	10	28	0	0	1
7	0	0	23	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2
8	0	0	17	0	0	11	0	0	84	0	0	11	3
9	0	32	2	0	1	0	6	0	0	0	14	0	1
10	92	0	0	0	0	33	19	0	0	21	0	13	3
...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
30	0	0	5	0	0	0	15	0	0	10	5	0	2

Доверительные уровни оценки технического состояния ПС занесены в таблицу 6.

Таблица 6

Уровни активации нейронов выходного слоя ИНС ($x_{18} - x_{29}$)

Выборка (тест)	Состояние ПС — Целевая	Состояние ПС — Выход	Состояние ПС-1 (доверительный уровень)	Состояние ПС-2 (доверительный уровень)	Состояние ПС-3 (доверительный уровень)
1	3	3	0,11	0,30	0,59
2	2	2	0,26	0,72	0,02
3	1	1	0,65	0,26	0,09
4	2	2	0,10	0,78	0,12
5	3	3	0,06	0,23	0,71
6	3	3	0,02	0,26	0,72
7	1	1	0,63	0,24	0,13
8	2	2	0,39	0,56	0,05
9	1	1	0,90	0,09	0,01
10	1	1	0,79	0,11	0,10

В результате применения искусственной нейронной сети, представленной на рис. 3, было установлено, что модель корректно определяет техническое состояние подъёмных сооружений в 100 % случаев. Среднее значение доверительных уровней оценки технического состояния ПС увеличилось с 0,628 до 0,705 для текущей модели. Это свидетельствует о повышении точности и надёжности прогнозов, что является важным показателем эффективности разработанной системы [19].

Выходной слой обученных нейронных сетей использует функцию активации softmax. Для каждого из трёх классов k степень уверенности модели вычисляется как: $p_{_k} = \exp(z_{_k}) / \sum_{j=1..3} \exp(z_{_j})$, где: $p_{_k}$ — степень уверенности (нормированная вероятность) того, что состояние относится к классу k ; $\exp(z_{_k})$ — экспонента от $z_{_k}$; $z_{_k}$ —

взвешенная сумма сигналов, поступающих от последнего скрытого слоя на выходной нейрон k : $\Sigma_{j=1..3} \exp(z_{jk})$ — сумма экспонент по всем трём классам (нормировочный коэффициент). Значения p_k для тестовых примеров приведены в таблицах 3, 5 и 7. Например, для тестового примера №5 (модель с 29 входами, таблица 7) значения z_k до нормализации составили: $z_1 = 0,82$ (класс 1), $z_2 = 1,15$ (класс 2), $z_3 = 1,95$ (класс 3). После применения softmax получены степени уверенности $p_1 = 0,06$, $p_2 = 0,23$, $p_3 = 0,71$. Таким образом, между комбинацией браковочных показателей на входе и уровнями активации выходных нейронов существует количественная связь, задаваемая архитектурой сети и её обученными весами. Для данного примера наибольшая активация ($p_3 = 0,70$) соответствует классу 3, что совпадает с экспертным заключением. Выявлено влияние количества входных параметров нейронной сети, включая дефекты канатно-блочной и тормозной систем, ходовой части, металлоконструкций и болтовых соединений на уровни достоверности определения технического состояния подъемных сооружений. Установлена численная зависимость между уровнями активации нейронов искусственной нейронной сети и техническим состоянием подъемных сооружений на основе комбинаций браковочных показателей, выраженных в процентах от допустимой степени повреждения. Результатом функционирования искусственных нейронных сетей является корректное определение технического состояния подъемных сооружений, подтвержденное специалистами в области промышленной безопасности [20].

Обсуждение. Увеличение количества входных параметров с 8 до 29 сопровождается ростом уровня доверия классификации. Наибольший вклад в это повышение вносят параметры металлоконструкций (x_9 – x_{17}). Вероятно, это обусловлено физической природой дефектов данной группы. В отличие от локальных повреждений ходовой части или канатно-блочной системы, которые обычно устраняются при текущем ремонте, остаточные прогибы и деформации несущих металлоконструкций отражают системные изменения, снижающие общую несущую способность сооружения. Именно сочетание локального износа и системных деформаций служит маркером перехода из класса 1 в класс 2. Параметры болтовых и заклепочных соединений, обеспечивающие дополнительный, хотя и меньший прирост уровня доверия, позволяют сети выявлять случаи ослабления стыков, характерные для предельного состояния (класс 3). Сравнение с литературными данными показывает, что полученные результаты согласуются с исследованиями по применению машинного обучения в диагностике технических систем. В них указано, что рост числа учитываемых параметров повышает точность прогнозов. Однако, в отличие от подходов, моделирующих отдельные физические процессы, предложенная модель оценивает интегральное состояние на основе совокупности браковочных показателей. Это делает её применимой при ограниченной информации о фактических режимах эксплуатации, что составляет её преимущество перед методами, требующими детальных данных о нагружении [21]. Помимо физической природы дефектов, на результаты модели повлияли корреляционные связи между входными параметрами. Остаточный прогиб пролётного строения (x_9) коррелирует с деформацией полки уголка (x_{16}), поскольку оба параметра отражают общее снижение жёсткости металлоконструкции. Аналогично износ поверхности реборды ходового колеса (x_1) и выработка поверхности катания (x_2) часто проявляются совместно. Подобные корреляции не являются недостатком метода, поскольку нейронные сети устойчивы к мультиколлинеарности — они способны перераспределять веса между коррелированными признаками без потери предсказательной способности. Однако наличие корреляций может приводить к завышенной оценке значимости группы взаимосвязанных признаков. Добавление параметров из разных групп вносит преимущественно новую, некоррелированную информацию, что объясняет повышение уверенности модели. Практическими результатами исследования являются разработка и обучение трёх ИНС с различным числом входных нейронов: первая ИНС содержит 8 входных нейронов и демонстрирует тестовую точность 100 % при объёме тестовой выборки 10 примеров и средней доверительной вероятности 0,628. Основное ограничение исследования — небольшой объём доступных экспертных данных (30 выборки). При таком объёме утверждение о 100 % точности на тестовой выборке не может рассматриваться как статистически надёжное. Результаты кросс-валидации (средняя точность 0,89, стандартное отклонение 0,07) дают более реалистичную оценку. Таким образом, представленные выводы носят предварительный характер. Повышение средней степени уверенности модели с 0,628 (8 входов) до 0,658 (17 входов), а затем до 0,705 (29 входов) обусловлено следующими факторами. Во-первых, дефекты металлоконструкций (остаточные прогибы, деформации стержней, местные вмятины) и дефекты болтовых и заклепочных соединений (ослабление натяжения, коррозия, трещины) содержат информацию, частично независимую от дефектов ходовой части и канатно-блочной системы. Это позволяет нейронной сети выявлять такие комбинации, при которых, например, незначительный износ ходовых колёс (менее 30 % от браковочного значения) в сочетании с заметным остаточным прогибом металлоконструкции (более 50 % от предельного значения) может свидетельствовать о необходимости сокращения межремонтного срока (класс 2), тогда как по отдельности каждый из этих дефектов мог бы быть отнесён к работоспособному состоянию (класс 1). Во-вторых, увеличение

размерности входного пространства при фиксированном объёме обучающей выборки (30 примеров) обычно повышает риск переобучения, однако в данном случае рост уверенности свидетельствует о том, что добавляемые параметры действительно содержат релевантную для классификации информацию, а не являются шумом [22]. В-третьих, браковочные показатели металлоконструкций и соединений нормированы в процентах от предельных значений, что позволяет сети с сопоставимой значимостью учитывать различные типы дефектов независимо от их физической природы.

Заключение. В ходе исследования разработаны и апробированы три модели искусственных нейронных сетей для комплексной оценки технического состояния подъемных сооружений по браковочным показателям, установленным федеральными нормами и правилами в области промышленной безопасности. По результатам исследования выполнены следующие задачи:

1. Систематизированы 29 браковочных показателей подъемных сооружений в соответствии с ФНП⁹. Показатели структурированы по трём группам: дефекты ходовой части, тормозной и канатно-блочной систем (x_1 – x_8); несущих металлоконструкций (x_9 – x_{17}); болтовых и заклепочных соединений (x_{18} – x_{29}). На их основе определены структуры входных данных для нейросетевых моделей.

2. Разработаны и обучены три модели многослойного персептрона с одинаковой архитектурой скрытых слоёв (три слоя по восемь нейронов) и входными слоями размерности 8, 17 и 29 нейронов соответственно. Все модели имеют выходной слой из трёх нейронов, соответствующих трём классам технического состояния.

3. Сформированы обучающие (30 примеров) и тестовые (10 примеров) выборки на основе 40 экспертных наборов дефектов, классифицированных тремя независимыми экспертами.

4. Проведено обучение и тестирование разработанных моделей. Все три модели показали 100 % точность классификации на тестовой выборке.

5. Установлено, что увеличение числа входных параметров повышает доверительный уровень классификации, что свидетельствует о значимости учёта комбинаций дефектов различных элементов подъемного сооружения.

Результаты носят предварительный характер и демонстрируют принципиальную возможность использования нейросетевого подхода для комплексной оценки ПС. Для внедрения в практическую деятельность необходимо расширение обучающей выборки до нескольких сотен реальных экспертных заключений и проведение валидации на независимом наборе данных.

Список литературы / References

1. Tao Li, Wei Wu, Xiufeng Li, Yongquan Li, Xueru Gong, Shuai Zhang, et al. A Hybrid Approach Combining Scenario Deduction and Type-2 Fuzzy Set-Based Bayesian Network for Failure Risk Assessment in Solar Tower Power Plants. *Sustainability*. 2025;17(11):4774. <https://doi.org/10.3390/su17114774>

2. Xing Pan, Zekun Wu. Performance Shaping Factors in the Human Error Probability Modification of Human Reliability. *International Journal of Occupational Safety and Ergonomics*. 2020;26(3):538–550. <https://doi.org/10.1080/10803548.2018.1498655>

3. Antipas IR. Modeling of Dynamic Loads Affecting a Bridge Crane during Start-Up. *Advanced Engineering Research (Rostov-on-Don)*. 2024;24(2):190–197. <https://doi.org/10.23947/2687-1653-2024-24-2-190-197>

4. Sagnak M, Kazancoglu Y, Ozen Y, Garza-Reyes JA. Decision-Making for Risk Evaluation: Integration of Prospect Theory with Failure modes and effects analysis (FMEA). *International Journal of Quality & Reliability Management*. 2020;37(6–7):939–956. <https://doi.org/10.1108/IJQRM-01-2020-0013>

5. Короткий А.А., Панфилов А.В., Хван Р.В., Юсупов А.Р. Интегральный метод оценки дефектов на работоспособность стального каната с использованием искусственных нейронных сетей. *Транспортное, горное и строительное машиностроение: наука и производство*. 2023;18:73–79. <https://doi.org/10.26160/2658-3305-2023-18-73-79>

6. Korotkiy AA, Panfilov AV, Khvan RV, Yusupov AR. Integral Method of Assessing Defects on the Operability of Steel Rope Using Artificial Neural Networks. *Transport, Mining and Construction Engineering: Science and Production*. 2023;18:73–79. <https://doi.org/10.26160/2658-3305-2023-18-73-79>

6. Аблязов Э.К., Аблязов К.А. Оценка технического состояния портового подъемно-транспортного оборудования (ПТО) с использованием нечеткой логики. *Морские интеллектуальные технологии*. 2024;2(1):242–251. <https://doi.org/10.37220/mit.2024.64.2.027>

- Ablyazov EK, Ablyazov KA. Assessment of the Technical Condition of Port Lifting and Transport Equipment (LTE) Using Fuzzy Logic. *Marine Intellectual Technologies*. 2024;2(1):242–251. <https://doi.org/10.37220/mit.2024.64.2.027>

7. Долгов О.С., Сафоклов Б.Б. Проектирование модели технического обслуживания и ремонта воздушных судов с использованием искусственных нейронных сетей. *Вестник Московского авиационного института*. 2022;29(1):19–26. <https://doi.org/10.34759/vst-2022-1-19-26>

⁹ Там же. С. 84–87

Dolgov OS, Safoklov BB. Developing Maintenance and Refurbishment Model of Aerial Vehicles with Artificial Neural Network Application. *Aerospace MAI Journal*. 2022;29(1):19–26. <https://doi.org/10.34759/vst-2022-1-19-26>

8. Машошин О.Ф., Гусейнов Г. Разработка комплексного алгоритма обработки диагностических параметров авиационных ГТД на основе многослойных нейронных сетей. *Контроль. Диагностика*. 2025;(7):41–54. <https://doi.org/10.14489/td.2025.07.pp.041-054>

Mashoshin OF, Huseynov G. Development of an Integrated Algorithm for Processing GTE Diagnostic Parameters Using Multilayer Neural Networks. *Testing. Diagnostics*. 2025;(7):41–54. <https://doi.org/10.14489/td.2025.07.pp.041-054>

9. Химченко А.В., Мищенко Н.И., Савчук О.В. Оценка возможности применения искусственных нейронных сетей для самодиагностики двигателя внутреннего сгорания с отключением цилиндров. *Тракторы и сельскохозяйственные машины*. 2022;89(3):175–186. <https://doi.org/10.17816/0321-4443-106169>

Khimchenko AV, Mishchenko NI, Savchuk OV. Evaluation of the Possibility of Using Artificial Neural Networks for Self-Diagnosis of an Internal Combustion Engine with Cylinder Deactivation. *Tractors and Agricultural Machinery*. 2022;89(3):175–186. <https://doi.org/10.17816/0321-4443-106169>

10. Хазиев М.Л. Диагностика надежности гидравлического привода с применением нейронных сетей. *Социально-экономические и технические системы: исследование, проектирование, оптимизация*. 2025;(1):114–122. <https://seats.elpub.ru/jour/article/view/179> (дата обращения: 08.09.2025).

Khaziev ML. Diagnostics of Hydraulic Drive Reliability Using Neural Networks. *Social-Economic and Technical Systems: Research, Design and Optimization*. 2025;(1):114–122. <https://seats.elpub.ru/jour/article/view/179> (accessed: 08.09.2025).

11. Ерохин В.В., Зафиров А.Е. Повышение качества разработки программного обеспечения для технических объектов машиностроения на основе нейронных суррогатов. *Мехатроника, автоматика и робототехника*. 2025;(15):89–92. <https://doi.org/10.26160/2541-8637-2025-15-89-92>

Erokhin VV, Zafirov AE. Improving the Quality of Software Development for Technical Objects of Mechanical Engineering Based on Neural Surrogates. *Mechatronics, Automation and Robotics*. 2025;(15):89–92. <https://doi.org/10.26160/2541-8637-2025-15-89-92>

12. Egelsky VV, Nikolaev NN, Egelskaya EV, Korotkiy AA. Influence of the Competencies of Lifting Crane Specialists on the Probability of Emergencies. *Safety of Technogenic and Natural Systems*. 2023;(2):70–79. <https://doi.org/10.23947/2541-9129-2023-7-2-70-79>

13. Khvan RV. Use of Artificial Neural Networks for Solving the Problem of Residual Resource Estimation of Hoisting Cranes. *E3S Web of Conferences*. 2024;515(11):04015. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202451504015>

14. Dennig D, Bureick J, Link J, Diener D, Hesse C, Neumann I. Comprehensive and Highly Accurate Measurements of Crane Runways, Profiles and Fastenings. *Sensors*. 2017;17(5):1118 <https://doi.org/10.3390/s17051118>

15. Khvan RV. Comparative Analysis of the Performance of Artificial Neural Networks in Assessing the Technical Condition of Steel Ropes. *Safety of Technogenic and Natural Systems*. 2024;(2):68–77. <https://doi.org/10.23947/2541-9129-2024-8-2-68-77>

16. Tong Yang, Ning Sun, He Chen, Yongchun Fang. Motion Trajectory-Based Transportation Control for 3-D Boom Cranes: Analysis, Design, and Experiments. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. 2019;66(5):3636–3646. <https://doi.org/10.1109/tie.2018.2853604>

17. Panasiuk JA, Adamus A. A Study on Elements of Machine Vision and Machine Learning in Industrial Vision Systems. *Problems of Mechatronics Armament Aviation Safety Engineering*. 2024;15(3):87–106. <https://doi.org/10.5604/01.3001.0054.7513>

18. Egelsky VV, Nikolaev NN, Egelskaya EV, Korotkiy AA. Use of Artificial Intelligence to Monitor the Reliability of Removable Load-Handling Devices. *Safety of Technogenic and Natural Systems*. 2024;(2):57–67. <https://doi.org/10.23947/2541-9129-2024-8-2-57-67>

19. Pullin R, Holford KM, Lark RJ, Eaton MJ. Acoustic Emission Monitoring of Bridge Structures in the Field and Laboratory. *Journal of Acoustic Emission*. 2008;26:172–181. URL: <https://www.ndt.net/article/ewgae2008/papers/136.pdf> (accessed: 08.10.2025)

20. Хван Р.В. Комплексная оценка технического состояния надземных рельсовых крановых путей с использованием искусственных нейронных сетей. *Безопасность труда в промышленности*. 2025;(6):7–13. <https://doi.org/10.24000/0409-2961-2025-6-7-13>

Khvan RV. Comprehensive Evaluation of the Technical State of Overhead Railway Crane Tracks Using Artificial Neural Networks. *Occupational Safety in Industry*. 2025;(6):7–13. <https://doi.org/10.24000/0409-2961-2025-6-7-13>

21. Molokov KA, Novikov VV, Dabalez M. Evaluation of the Occurrence of Initial Failures from Stress Concentrators in Welded Joints and Structural Elements. *Advanced Engineering Research (Rostov-on-Don)*. 2023;23(1):41–54. <https://doi.org/10.23947/2687-1653-2023-23-1-41-54>

22. Sobhanifard F. Optimization of Bayesian Neural Networks Using Hybrid PSO and Fuzzy Logic Approach for Time Series Forecasting. *Discover Artificial Intelligence*. 2025;5(132). <https://doi.org/10.1007/s44163-025-00322-9>

Об авторах:

Роман Владимирович Хван, кандидат технических наук, доцент кафедры «Эксплуатация транспортных систем и логистика» Донского государственного технического университета (344003, Российская Федерация, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), [SPIN-код](#), [ORCID](#), [ScopusID](#), [ResearcherID](#), [ResearchGate](#), khvanroman@yandex.ru

Анатолий Аркадьевич Короткий, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Эксплуатация транспортных систем и логистика» Донского государственного технического университета (344003, Российская Федерация, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), [SPIN-код](#), [ORCID](#), [ScopusID](#), [ResearcherID](#), korotaa@gmail.com

Заявленный вклад авторов:

Р.В. Хван: разработка методологии, административное руководство исследовательским проектом, проведение исследования, написание рукописи, визуализация, формальный анализ, валидация результатов, курирование данных, написание черновика рукописи.

А.А. Короткий: разработка концепции, научное руководство.

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Декларация ИИ: авторы заявляют, что при подготовке рукописи «Контроль технического состояния подъемных сооружений и оборудования с использованием искусственных нейронных систем» не использовались технологии генеративного искусственного интеллекта (ИИ), ИИ не является соавтором публикации: авторство присвоено только физическим лицам, внёсшим существенный интеллектуальный вклад в исследование.

About the Authors:

Roman V. Khvan, Cand.Sci. (Eng.), Associate Professor of the Department of Transport Systems Operation and Logistics, Don State Technical University (1, Gagarin Sq., Rostov-on-Don, 344003, Russian Federation), [SPIN-code](#), [ORCID](#), [ScopusID](#), [ResearcherID](#), [ResearchGate](#), khvanroman@yandex.ru

Anatoly A. Korotky, Dr.Sci. (Eng.), Professor, Head of the Department of Transport Systems Operation and Logistics, Don State Technical University (1, Gagarin Sq., Rostov-on-Don, 344003, Russian Federation), [SPIN-code](#), [ORCID](#), [ScopusID](#), [ResearcherID](#), korotaa@gmail.com

Claimed Contributorship:

RV Khvan: methodology, project administration, investigation, visualization, formal analysis, validation, data curation, writing – original draft preparation, writing – review & editing.

AA Korotky: conceptualization, supervision.

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

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

AI Declaration: The authors declare that generative artificial intelligence (AI) technologies were not used in the preparation of the manuscript “Technical Condition Monitoring of Lifting Structures and Equipment Using Artificial Neural System” and that AI is not a co-author of the publication: authorship is assigned only to natural persons who have made a substantial intellectual contribution to the research.

Поступила в редакцию / Received 04.05.2026

Поступила после рецензирования / Reviewed 21.05.2026

Принята к публикации / Accepted 09.06.2026

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



УДК 004.93

Оригинальное эмпирическое исследование

<https://doi.org/10.23947/2687-1653-2026-26-3-2437>

Исследование методов распознавания эмоций человека на основе цифрового анализа изображений

С.А. Филичкин , С.В. Вологдин 

Ижевский государственный технический университет имени М.Т. Калашникова, г. Ижевск,

Российская Федерация, <https://ror.org/01pvdd334>✉ qwerty70@gmail.com

EDN: MEPLPA

Аннотация

Введение. Распознавание базовых эмоций по изображению лица востребовано в мониторинге водителей, медицинских интерфейсах и образовательной аналитике. С июля 2024 года в ЕС такие системы стали нормативным требованием. Среди методических подходов в данной области нейросетевые архитектуры обеспечивают высокую точность, однако требуют значительных обучающих выборок и обладают низкой интерпретируемостью, что особенно важно для задач безопасности. Классические дескрипторы LBP и HOG, напротив, характеризуются вычислительной экономичностью и интерпретируемостью, однако в сопоставимых условиях изучены недостаточно: сохраняются вопросы об устойчивости их метрик при кросс-валидации на компактных наборах и о природе смещений визуально близких эмоций. В этом контексте предполагалось, что наблюдаемая в подобных протоколах близкая к идеальной точность HOG отражает утечку идентичностей субъектов между обучающей и тестовой выборками и тем самым завышает оценку обобщающей способности дескриптора. Цель исследования — оценить LBP и HOG на наборе данных JAFFE в едином воспроизводимом конвейере и определить границы их применимости.

Материалы и методы. Для решения поставленных задач исследование организовано как сравнительное эмпирическое сопоставление преимуществ двух классических дескрипторов в рамках единого воспроизводимого протокола. В качестве экспериментальной базы использован открытый набор данных JAFFE (Lyons et al., 1998); 213 полутоновых изображений десяти испытуемых с семью базовыми эмоциями), а оценка качества классификации выполнялась по схеме стратифицированной пятикратной кросс-валидации. На этапе предварительной обработки изображения проходили нормализацию яркости (гистограммное выравнивание) и геометрическое выравнивание по опорным точкам лица. Затем на подготовленных кадрах извлекались дескрипторы LBP (текстура) и HOG (контурная геометрия), конкретные параметры которых детально приведены в тексте статьи. Полученные признаки подавались на вход линейного классификатора SVM, при этом параметр регуляризации подбирался по сетке {0,01; 0,1; 1; 10} в ходе внутренней трёхкратной кросс-валидации. Качество распознавания оценивали как среднее значение $\pm$ стандартное отклонение метрик Accuracy (точность) и Macro-F1 (макро-усредненная F1-мера) по результатам пяти внешних фолдов. Программная реализация всего конвейера выполнена на языке Python 3.10 (с использованием библиотек scikit-learn 1.3 и scikit-image 0.21).

Результаты исследования. В ходе проведённого эксперимента метод HOG в сочетании с линейным SVM (support vector machine, метод опорных векторов) обеспечил полное разделение семи эмоциональных классов на наборе данных JAFFE в рамках выбранного стратифицированного протокола. При использовании того же алгоритмического порядка метод LBP продемонстрировал существенно более низкую точность и выявил специфическую структуру систематических смещений: устойчиво неразличимыми оказались пары «страх – удивление» и «грусть – нейтральное выражение», а распределение метрик по категориям количественно определило фундаментальные различия между контурным и текстурным признаковыми представлениями.

Обсуждение. Полученные результаты свидетельствуют о решающем влиянии протокола разделения данных на итоговую оценку качества классических дескрипторов. В частности, идеальная разделимость признаков HOG объясняется сохранением идентичностей субъектов в обучающей и тестовой выборках, что полностью согласуется с известной чувствительностью градиентного профиля к индивидуальным особенностям лица. В отношении дескриптора LBP наблюдаемые значения точности попадают в диапазон, характерный для эталонной работы авторов Shan, Gong, McOwan. Однако структура ошибочных срабатываний, зафиксированная в настоящем исследовании, впервые детально интерпретирована посредством FACS-описания перекрывающихся наборов активных лицевых мышц, что ранее отсутствовало в опубликованных сравнительных обзорах.

Заключение. В работе успешно решены задачи по сравнительной оценке методов LBP и HOG, построению полностью воспроизводимого программного конвейера и содержательной интерпретации ошибок автоматической классификации. На основе полученных эмпирических данных модель HOG в связке с линейным классификатором SVM признана целесообразной для лабораторных задач с фиксированным составом испытуемых, тогда как применение LBP в аналогичной комбинации оправдано в качестве компонента гибридных архитектур со сверточными или рекуррентными нейронными сетями. В прикладной плоскости выводы применимы при проектировании современных систем распознавания эмоциональных состояний для медицинских интерфейсов и систем мониторинга психофизиологического состояния водителя. Вместе с тем существенными ограничениями исследования являются малый объем набора данных JAFFE и строго лабораторные условия съёмки. Преодоление данных факторов в дальнейших изысканиях предполагает переход к более сложному протоколу с полным исключением субъекта из обучающей выборки и проведение сопоставления с актуальными моделями глубокого обучения.

Ключевые слова: распознавание эмоций, поведенческий анализ, компьютерное зрение, цифровая обработка изображений, JAFFE, LBP, HOG, SVM, FACS, матрица ошибок

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

Для цитирования. Филичкин С.А., Вологдин С.В. Исследование методов распознавания эмоций человека на основе цифрового анализа изображений. *Advanced Engineering Research (Rostov-on-Don)*. 2026;26(3):2437. <https://doi.org/10.23947/2687-1653-2026-26-3-2437>

Original Empirical Research

A Study of Human Emotion Recognition Methods Based on Digital Image Analysis

Sergey A. Filichkin , Sergey V. Vologdin 

Kalashnikov Izhevsk State Technical University, Izhevsk, Russian Federation, <https://ror.org/01pvdd334>

qwerty70@gmail.com

Abstract

Introduction. The recognition of basic emotions from facial images is increasingly required in driver monitoring systems, medical user interfaces, and educational learning analytics. As of July 2024, such systems have been mandated by EU regulations. Among the methodological approaches in this area, neural-network architectures reach high accuracy but require large training samples and remain opaque, which is critical in safety applications. Classical descriptors LBP and HOG, in contrast, are computationally efficient and interpretable. However, their performance under comparable conditions remains underexplored: there are still questions regarding the stability of their metrics under cross-validation on compact datasets, as well as the nature of confusions between visually similar emotions. In this context, it was assumed that the near-perfect accuracy of HOG observed in such protocols reflected leakage of subject identities between the training and test sets, thereby overestimating the generalization ability of the descriptor. The objective of the study was to evaluate LBP and HOG on the JAFFE dataset in a single, reproducible pipeline, and determine the limits of their applicability.

Materials and Methods. To address the stated tasks, the study was organized as a comparative empirical evaluation of two classical descriptors within a single reproducible protocol. The open JAFFE dataset (Lyons et al., 1998; 213 grayscale images of ten subjects with seven basic emotions) served as the experimental basis, with quality assessed under stratified five-fold cross-validation. The images underwent intensity normalization (histogram equalization) and geometric alignment by facial landmarks. Then, on the prepared frames, the LBP (texture) and HOG (contour geometry) descriptors were extracted, with specific parameters reported in the body of the article. The resulting features were fed to a linear SVM (support vector machine), with the regularization parameter tuned using a grid search over {0.01, 0.1, 1, 10} via internal three-fold cross-validation. Quality was assessed as the mean $\pm$ standard deviation of Accuracy and Macro-F1 metrics across five outer folds. The software implementation of the entire pipeline was done in Python 3.10 (using the scikit-learn 1.3 and scikit-image 0.21 libraries).

Results. In the experiment, HOG combined with linear SVM provided complete separation of the seven emotional classes on the JAFFE dataset within the selected stratified protocol. Under the same algorithmic order, LBP showed significantly lower accuracy and revealed a specific structure of systematic confusion errors: the pairs “fear — surprise” and “sadness — neutral” provided consistently indistinguishable, while the category-wise distribution of metrics quantified the fundamental differences between contour and texture feature representations.

Discussion. The results obtained indicate the decisive impact of the data splitting protocol on the final assessment of classical descriptors. Specifically, the perfect separability of HOG features is explained by preservation of subject identities across training and test sets, and is fully consistent with the known sensitivity of the gradient profile to individual facial features. With respect to LBP, the observed values fall within the range known from the reference work by Shan, Gong, and McOwan. However, the pattern of false positives documented in the present study is the first to be interpreted in detail through FACS description of overlapping sets of active facial muscles, which has previously been absent from published comparative reviews.

Conclusion. The work has successfully solved the problems of comparative evaluation of LBP and HOG methods, construction of a fully reproducible software pipeline, and meaningful interpretation of automatic classification errors. Based on the data obtained, the HOG model combined with a linear SVM is suitable for laboratory tasks with a fixed set of subjects, whereas LBP in the same combination is justified as a component of hybrid architectures with convolutional or recurrent networks. In applied terms, the results can be used in the design of emotion recognition systems for medical interfaces and driver-monitoring systems. At the same time, the limitations of the work include the compact JAFFE dataset and the laboratory imaging conditions. Addressing these limitations, future work will involve moving to a more demanding protocol with full subject-out exclusion from the training set, as well as a comparative evaluation against current deep learning models.

Keywords: emotion recognition, behavioral analysis, computer vision, digital image processing, JAFFE, LBP, HOG, SVM, FACS, confusion matrix

Acknowledgements. The authors would like to thank the Editorial board and the reviewers for their attentive attitude to the manuscript and for the specified comments that improved the quality of the article.

For Citation. Filichkin SA, Vologdin SV. A Study of Human Emotion Recognition Methods Based on Digital Image Analysis. *Advanced Engineering Research (Rostov-on-Don)*. 2026;26(3):2437. <https://doi.org/10.23947/2687-1653-2026-26-3-2437>

Введение. Распознавание базовых эмоций по изображению лица относится к числу востребованных задач компьютерного зрения, имеющих как исследовательское, так и нормативное значение. С июля 2024 года новые транспортные средства категорий М (легковые) и N (грузовые) в ЕС обязаны оснащаться системами мониторинга состояния водителя согласно Regulation (EU) 2019/2144¹. Именно поэтому методы компьютерного зрения с анализом мимики, направления взгляда и положения головы применяются в системах распознавания отвлечения (ADDW, Advanced Driver Distraction Warning) и Euro NCAP DMS. Параллельно те же методы анализа выражений лица востребованы в медицинской диагностике, мониторинге операторов на транспорте и образовательной аналитике. В этих сферах автоматический анализ обеспечивает более высокую воспроизводимость по сравнению с опросами и субъективным наблюдением.

Прикладной интерес к таким системам опирается на достаточно устойчивый теоретический фундамент. В частности, мимические реакции человека разнообразны и возникают спонтанно, что усложняет их интерпретацию, однако, несмотря на культурные и индивидуальные различия, стандартные выражения лица признаются в литературе устойчивыми индикаторами эмоционального состояния [1]. Именно универсальность таких выражений легла в основу систем кодирования лицевой активности и обеспечила теоретическую базу для алгоритмов автоматического распознавания. Параллельно развиваются мультимодальные подходы, использующие физиологические сигналы для объективной оценки эмоциональных реакций; они служат дополнением визуальных методов и расширяют возможности интегральной оценки состояния человека.

На методическом уровне современное состояние области распознавания лиц обобщено в обзорных работах [1]. Среди классических признаков представлений лица особое место занимают локальные бинарные шаблоны (LBP), описывающие текстурные неоднородности лица и инвариантные к монотонным изменениям освещения [2], а также гистограммы ориентированных градиентов (HOG), характеризующие контурную геометрию через локальные распределения градиентов [3]. Историческую преемственность с ними образуют каскадные детекторы Виолы-Джонса на Хагг-подобных признаках с алгоритмом AdaBoost, обеспечившие внедрение детекции лиц в потребительские камеры, а также дескриптор SIFT, детектирующий масштабно-инвариантные особые точки в окрестности лицевых ориентиров.

¹ Regulation of the European Parliament and of the Council on type-approval requirements for motor vehicles and their trailers, and systems, components and separate technical units intended for such vehicles, as regards their general safety and the protection of vehicle occupants and vulnerable road users. Regulation (EU) 2019/2144 of 27 November 2019. Official Journal of the European Union. 2019;325:1–40. URL: <https://eur-lex.europa.eu/eli/reg/2019/2144/oj> (дата обращения: 15.06.2026).

Прикладная зрелость направления подтверждается обзорами современных методов автоматического анализа мимики [4], клиническими работами по распознаванию эмоций [5] и зрелыми коммерческими системами анализа эмоций: объективная оценка состояния по лицу уже востребована на практике. Однако сами по себе коммерческие комплексы не отвечают на методический вопрос — их алгоритмы закрыты и не позволяют оценить, какой вклад в точность вносит отдельный классический дескриптор; опубликованные же сравнения LBP и HOG получены в разнородных условиях и плохо сопоставимы между собой. Это, в свою очередь, поднимает вопрос о том, как ведут себя классические дескрипторы в строго единых условиях оценки.

Параллельно методы анализа изображений отрабатываются в смежных областях компьютерного зрения — программных системах видеонаблюдения [6], мониторинге состояния водителей [7], трёхмерном захвате движения [8], идентификации параметров оптического потока [9] и распознавании автомобильных номерных знаков [10]. Опыт этих работ показывает, что точная локализация признаков и устойчивая классификация остаются критическими требованиями независимо от целевой задачи.

На фоне этих общих требований распознавание эмоций по-прежнему остаётся открытой задачей даже для свёрточных нейронных сетей (CNN), широко внедряемых в компьютерном зрении. В сводном анализе [11] отмечается, что глубокие модели прежде всего сталкиваются с переобучением из-за ограниченной доступности обучающих данных и с не связанными с выражением лица вариациями — освещения, поворота головы, разрешения изображения и смещения идентичности. Помимо этого, создание набора данных с разметкой эмоций трудоёмко и дорого, а в транспортной и медицинской безопасности дополнительно требуется объяснимость решений, ограничивающая применение «чёрного ящика». Отдельной проблемой остаётся запоминание моделью конкретных субъектов, особенно заметное на небольших наборах данных [12].

Обобщая сказанное, можно выделить устойчивую закономерность: для распознавания выражений лица единственный классический дескриптор уступает обучаемому представлению. LBP обеспечивает более устойчивые показатели в условиях переменного освещения благодаря инвариантности к монотонным преобразованиям яркости [2]; HOG, напротив, лучше описывает контурную геометрию лица и сохраняет лидерство на лабораторных наборах данных [3]. Вместе с тем оба метода в одиночном варианте уступают свёрточным нейронным сетям на крупных наборах данных [4]. Сравнительно высокая точность достигается при объединении LBP-признаков с обучаемыми представлениями на основе CNN или LSTM (long short-term memory, рекуррентные сети с долгой краткосрочной памятью) [7]; близкие выводы обобщает сводный анализ современных методов распознавания выражений лица [11]. При этом каскадные детекторы Виолы-Джонса и их развитие по-прежнему обеспечивают приемлемое качество локализации лиц при низких вычислительных затратах, что подтверждается современными системами аутентификации по лицу на основе классических признаков [13]. Сопоставление условий применения, размеров обучающих выборок и протоколов проверки в разных источниках затруднено их методической разнородностью.

Из перечисленного видно, что для классических дескрипторов LBP и HOG в задаче распознавания эмоций недостаточно описаны несколько аспектов: устойчивость метрик при стратифицированной кросс-валидации на небольших наборах данных; природа систематических ошибок между визуально близкими эмоциями; границы применимости в режимах с переменным освещением и неконтролируемым ракурсом. Без этих сведений невозможно осмысленно встраивать классические признаки в гибридные схемы распознавания, поэтому возникает потребность в их прямом сопоставлении в единых и воспроизводимых условиях.

Поэтому цель настоящей работы — определить пределы применимости классических дескрипторов LBP и HOG в задаче распознавания семи базовых эмоций на наборе JAFFE и характеристика наблюдаемых ошибок классификации.

Для достижения поставленной цели в исследовании решены пять задач:

- 1) сопоставление теоретических свойств LBP и HOG применительно к распознаванию выражений лица — устойчивости к освещению, чувствительности к идентичности субъекта, размерности признакового представления;
- 2) реализация единого конвейера предобработки изображений и извлечения признаков LBP и HOG для набора JAFFE, обеспечивающего воспроизводимость результата;
- 3) классификация семи базовых эмоций методом опорных векторов с линейным ядром при пятикратной стратифицированной кросс-валидации;
- 4) интерпретация матриц ошибок и метрик Accuracy и Macro-F1 с привязкой к психофизиологическому объяснению систематических смещений эмоциональных классов;
- 5) формулировка рекомендаций по применению LBP и HOG для типичных сценариев, условий съёмки и путей встраивания классических признаков в гибридные архитектуры.

Методология настоящего исследования опирается на канон классической цифровой обработки изображений [14] — нормализацию яркости, гистограммное выравнивание, выделение признаков локальных текстур и градиентов.

Материалы и методы. Набор данных. В качестве экспериментальной базы использован открытый исследовательский набор данных JAFFE (Japanese Female Facial Expression, «японское женское выражение лица», Lyons et al., 1998; университет Kyushu, Япония), распространяемый для научных целей. Набор содержит 213 полутоновых изображений десяти испытуемых-японок с семью базовыми эмоциями: гнев, отвращение, страх, счастье, нейтральное выражение, грусть, удивление; классы распределены практически равномерно — от 29 до 32 изображений на эмоцию. Изображения получены в лабораторных условиях при одинаковом освещении и фронтальном ракурсе с постановочными выражениями, что обеспечивает однородность съёмки, но ограничивает прямой перенос результатов на полевые сценарии. Входные изображения JAFFE приводили к полутоновой палитре с разрешением 256×256 пикселей. Для нормализации яркости применяли гистограммное выравнивание. Лица выравнивали по координатам глаз, полученным с помощью детектора ориентиров на базе библиотеки Dlib (модель `shape_predictor_68_face_landmarks`).

Извлечение признаков. На подготовленных таким образом изображениях вычисляли два взаимодополняющих классических дескриптора. Локальные бинарные шаблоны (LBP) рассчитывали в `uniform`-кодировке (равномерной) с радиусом $R = 1$ и числом соседей $P = 8$; гистограммы строили по непересекающимся блокам 16×16 пикселей и объединяли в общий вектор признаков размерностью 15 104. Гистограммы ориентированных градиентов (HOG) формировали с ячейками 8×8 пикселей, блоками 2×2 ячейки, девятью ориентационными бинами и блочной нормализацией L2-Nus (значение по умолчанию в `scikit-image`).

Классификация и оценка качества. Полученные признаковые векторы подавали на классификатор методом опорных векторов с линейным ядром (SVM). Параметр регуляризации C перебирали по сетке $\{0,01; 0,1; 1; 10\}$ с выбором значения по внутренней трёхкратной кросс-валидации, вложенной во внешний цикл стратифицированной пятикратной кросс-валидации. Качество оценивали по среднему и стандартному отклонению Accuracy и Macro-F1 по пяти внешним фолдам. Дополнительно были построены матрицы ошибок (confusion matrices), а также проанализировано распределение метрик точности (precision), полноты (recall) и F1-меры для каждого из семи классов.

Программная реализация. Конвейер реализован в среде Python 3.10 с использованием библиотек `scikit-learn` 1.3 (SVM, кросс-валидация) и `scikit-image` 0.21 (LBP, HOG). Начальное значение генератора псевдослучайных чисел было зафиксировано (`random_state = 42`), что обеспечивает воспроизводимость разбиения выборки на фолды и повторяемость выбора гиперпараметров.

Результаты исследования. Метод HOG в сочетании с линейным SVM достиг полной разделимости семи эмоциональных классов: Accuracy = $1,000 \pm 0,000$ и Macro-F1 = $1,000 \pm 0,000$ (среднее $\pm$ стандартное отклонение по пяти внешним фолдам; таблица 1, рис. 1). Для всех семи классов метрики precision, recall и F1 приняли значение 1,00; межклассовых пересечений на матрице ошибок не выявлено. Размерность итогового признакового вектора HOG составила 34 596 элементов; во всех пяти внешних фолдах внутренняя кросс-валидация выбрала значение параметра регуляризации $C = 1$. Среднее время извлечения признаков на одно изображение составило около 0,018 с, обучения классификатора на тренировочном фолде — 0,42 с, предсказания на одно изображение — 0,003 с.

Таблица 1

Результаты классификации эмоций на наборе JAFFE

Метод	Ассурасу (точность)	Макро-F1 (макро-усредненная F1-оценка)
LBP	0,30	0,20
HOG	1,00	1,00

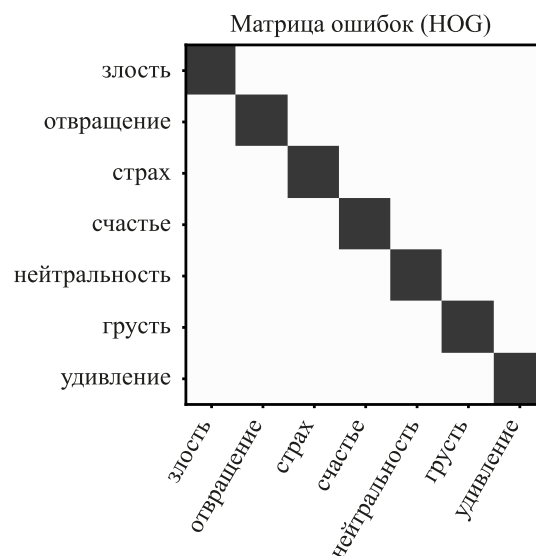


Рис. 1. Матрица ошибок метода HOG

Метод LBP в том же протоколе показал Accuracy = $0,300 \pm 0,041$ и Macro-F1 = $0,202 \pm 0,038$ (таблица 1). По пяти внешним фолдам значения Accuracy составили 0,256; 0,310; 0,310; 0,357 и 0,267. Размерность итогового признакового вектора LBP составила 15 104 элемента; внутренняя кросс-валидация выбрала значение $C = 0,1$ в трёх внешних фолдах и $C = 1$ в двух остальных. Среднее время извлечения признаков на одно изображение составило около 0,009 с; обучения классификатора — 0,18 с; предсказания — 0,002 с.

Распределение значений precision, recall и F1 по семи классам JAFFE для метода LBP оказалось неравномерным (таблица 2). Максимальные значения F1 наблюдались для классов «отвращение» (0,33) и «счастье» (0,30); минимальные значения — у классов «страх» (0,11), «грусть» (0,14) и «нейтральное» (0,14). Минимальные значения precision зафиксированы у классов «нейтральное» (0,12), «страх» (0,13) и «удивление» (0,14); минимальные значения recall — у классов «страх» (0,10), «грусть» (0,11) и «нейтральное» (0,17). У классов «удивление» и «нейтральное» recall превысил precision более чем на 0,05; у класса «грусть» precision превысил recall на 0,07.

Таблица 2

Precision, recall и F1-мера метода LBP по семи классам набора JAFFE

Класс	Precision	Recall	F1
Гнев	0,20	0,24	0,22
Отвращение	0,35	0,31	0,33
Страх	0,13	0,10	0,11
Счастье	0,32	0,28	0,30
Нейтральное	0,12	0,17	0,14
Грусть	0,18	0,11	0,14
Удивление	0,14	0,25	0,18
Макро-среднее	0,21	0,21	0,20

На матрице ошибок LBP (рис. 2) класс «страх» был отнесён к «удивлению» в 24,1 % случаев, к «гневу» — в 14,8 % и к «нейтральному» — в 11,1 %. Класс «грусть» был отнесён к «нейтральному» в 27,6 % случаев и к «гневу» — в 10,3 %. Класс «нейтральное» был отнесён к «грусти» в 16,7 % случаев. Наибольшие диагональные значения матрицы ошибок зафиксированы у классов «отвращение» и «счастье» — около 33 % и 30 % соответственно.

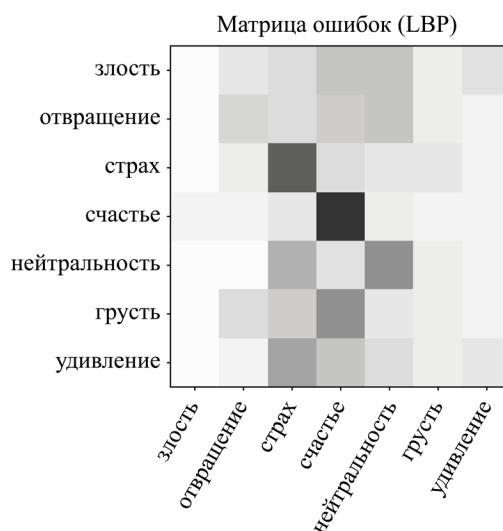


Рис. 2. Матрица ошибок метода LBP

Обсуждение. Сравнение результатов проведённых исследований с другими работами по распознаванию выражений лица показывает, что прямое сопоставление количественных значений требует оговорки об условиях эксперимента. В работе Shan, Gong, McOwan [15] на JAFFE использованы тщательно подобранные параметры LBP: радиус $R = 2$, разбиение на 42 субрегиона 18×21 пикселя, uniform-кодировка. При таком наборе и линейном SVM показатели Accuracy выше, чем у конвейеров с типовыми настройками. Настоящая работа опирается на другую конфигурацию: радиус $R = 1$, непересекающиеся блоки 16×16 пикселей на изображении 256×256 , итоговый вектор признаков размерностью 15 104. Это типовое представление LBP с дескрипторной реализацией «из коробки»; конфигурация подбиралась под задачу проверить поведение метода в стандартных условиях, а воспроизведение количественных значений [15] в задачу настоящего исследования не входило. Расхождение результатов с эталонной работой подтверждает известную чувствительность LBP к выбору радиуса и схемы разбиения.

Помимо проведения непосредственного сопоставления, существенным ориентиром выступают гибридные архитектуры: применение LBP на входных уровнях свёрточных или рекуррентных нейронных сетей способно обеспечить значительно более высокие качественные показатели в сравнении с изолированным классификатором [12]. В данном контексте результаты, полученные для метода HOG в рамках настоящего протокола, следует интерпретировать не как свидетельство универсального превосходства указанного дескриптора, а как маркер высокой чувствительности градиентного профиля к сохранению идентичности субъектов в обучающей и тестовой выборках; при этом качество кодирования эмоциональных состояний при подобном разделении данных оказывалось вторичным фактором.

Для более корректной оценки обобщающей способности алгоритмов целесообразно использовать экспериментальный протокол с исключением субъекта (LOSO, leave-one-subject-out), при реализации которого обучающая и тестовая выборки не содержат изображений одних и тех же лиц. Примененная в работе пятикратная стратифицированная кросс-валидация допускает присутствие идентичностей в обоих подмножествах, что приводит к искусственному завышению метрик для HOG; в таких условиях сравнительная диагностика методов характеризуется систематическим смещением.

Анализ структуры детекции ошибок показывает, что смещения классов, зафиксированные в матрице ошибок для LBP, имеют под собой четкое психофизиологическое обоснование. Так, пары «страх – удивление» и «грусть – нейтральное выражение» отличаются наличием перекрывающихся групп активных лицевых мышц согласно системе FACS — в первом случае наблюдается подъем бровей и расширение глаз, во втором — слабовыраженная амплитуда специфических действий, характерных для грустного выражения (AU1 + AU4 + AU15), на статичных снимках. Текстурные признаки LBP фиксируют локальные неоднородности и неизбежно отражают данное визуальное сходство; таким образом, регистрируемая погрешность детерминирована ограничениями признакового пространства, тогда как сам классификатор функционирует корректно.

Совокупность представленных наблюдений демонстрирует, что стандартная пятикратная кросс-валидация обладает ограниченной эффективностью при оценке методов распознавания мимики на компактных наборах данных. Даже при строгом соблюдении существующих методологических требований итоговые результаты склонны переоценивать качество обобщения на новых персонах. Переход к протоколу LOSO, вовлечение более масштабных баз данных с вариативными условиями регистрации и жесткий контроль отсутствия пересекающихся идентичностей между выборками являются обязательными условиями для получения объективной оценки.

Сформулированные выводы получены в условиях, накладывающих определенные ограничения на возможность широкого обобщения:

- использованный набор данных JAFFE характеризуется относительно малым объемом (213 изображений десяти испытуемых) и этнической однородностью, что не позволяет экстраполировать числовые показатели на популяции с иными антропометрическими параметрами;
- снимки выполнены в лабораторной среде при стабильном освещении и фронтальном ракурсе с имитацией выражений, в то время как полевые сценарии предполагают наличие динамического освещения, произвольных ракурсов и спонтанных реакций;
- процедура классификации реализована единственным типом алгоритма — линейным SVM — без проведения сопоставления с ядрами иных типов или глубокими обучаемыми архитектурами;
- объектом анализа выступали исключительно статические изображения без учета временной динамики мимических сокращений, доступной в видеопотоке.

С учетом указанных факторов полученные результаты подтверждают целесообразность эксплуатации методов LBP и HOG в специфических условиях, детерминированных физической природой каждого дескриптора. Применение HOG показано в рамках лабораторных задач с фиксированным составом участников и контролируемой инсоляцией, где допустима идентификационно-связанная разделимость классов. Метод LBP уступает по точности как самостоятельный инструмент, однако обеспечивает более устойчивую оценку в условиях нестабильного освещения и неконтролируемых ракурсов, что делает его эффективным элементом признакового описания в составе гибридных систем с обучаемыми моделями.

Заключение. В ходе исследования были решены поставленные задачи: сопоставлены свойства LBP и HOG применительно к распознаванию выражений лица, реализован единый воспроизводимый конвейер предобработки и извлечения признаков, проведена классификация семи базовых эмоций линейным SVM, построены матрицы ошибок и сформулированы рекомендации по применению дескрипторов. В едином протоколе на JAFFE метод HOG с линейным SVM достиг $\text{Assigasy} = 1,000 \pm 0,000$, что объясняется утечкой идентичности субъекта при стратифицированной кросс-валидации; LBP при том же протоколе дал $\text{Assigasy} = 0,300 \pm 0,041$ и устойчивые систематические смещения пар «страх – удивление» и «грусть – нейтральное выражение», согласующиеся с FACS-описанием перекрывающихся наборов лицевых мышц.

С позиции практического внедрения, модель на основе HOG и линейного SVM применима для решения локальных лабораторных задач с постоянным составом испытуемых, например, на исследовательских стендах или в пилотных версиях медицинских интерфейсов. Использование LBP совместно с линейным SVM в изолированном виде менее эффективно по точности, однако обосновано в роли компонента гибридных архитектур (включающих сверточные и рекуррентные сети) ввиду высокой вычислительной экономичности и инвариантности к монотонным флуктуациям освещенности. Полученные результаты могут быть востребованы при проектировании систем мониторинга состояния водителя, соответствующих требованиям Regulation (EU) 2019/2144, а также для методологического обоснования выбора протоколов оценки качества на малых выборках. С учетом выявленных ограничений приоритетным направлением дальнейших изысканий видится переход к протоколам с исключением субъектов и расширение экспериментального материала за счет данных, полученных в неконтролируемой среде.

Список литературы / References

1. Gururaj HL, Soundarya BC, Priya S, Shreyas J, Flammini F. A Comprehensive Review of Face Recognition Techniques, Trends, and Challenges. *IEEE Access*. 2024;12:107903–107926. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2024.3424933>
2. Ojala T, Pietikäinen M, Mäenpää T. Multiresolution Gray-Scale and Rotation Invariant Texture Classification with Local Binary Patterns. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*. 2002;24(7):971–987. <https://doi.org/10.1109/TPAMI.2002.1017623>
3. Dalal N, Triggs B. Histograms of oriented gradients for human detection. In: *Proc. IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR'05)*. San Diego, CA: IEEE; 2005. P. 886–893. <https://doi.org/10.1109/CVPR.2005.177>
4. Shan Li, Weihong Deng. Deep Facial Expression Recognition: A Survey. *IEEE Transactions on Affective Computing*. 2022;13(3):1195–1215. <https://doi.org/10.1109/TAFFC.2020.2981446>
5. Ляко Е.Е., Фролова О.В., Григорьев А.С., Филатова Ю.О., Махныткина О.В. Распознавание эмоциональных состояний детей с синдромом Дауна по мимической экспрессии: перцептивный и автоматический анализ динамических изображений. *Экспериментальная психология*. 2022;15(3):140–158. <https://doi.org/10.17759/exppsy.2022150310>
- Lyakso EE, Frolova OV, Grigorev AS, Filatova YuO, Makhnytkina OV. Recognition of Emotional States of Children with Down Syndrome by Facial Expression: Perceptual and Automatic Analysis of Dynamic Images. *Experimental Psychology (Russia)*. 2022;15(3):140–158. <https://doi.org/10.17759/exppsy.2022150310>
6. Шадрина А.С. Значение программного обеспечения для видеонаблюдения в наше время. В: *Труды Всероссийской научно-практической конференции курсантов и студентов «III научно-педагогические чтения молодых учёных имени профессора С.В. Познышева», Воронеж, 19 апреля 2023 года*. Воронеж: Воронежский институт ФСИН России; 2023. С. 113–116.
- Shadrina AS. The Significance of Video Surveillance Software Today. In: *Proc. All-Russian Scientific and Practical Conference of Cadets and Students “III Scientific and Pedagogical Readings of Young Scientists Named After Professor SV Poznyshv”*. Voronezh: Voronezh Institute of the Federal Penitentiary Service of Russia; 2023. P. 113–116. (In Russ.)
7. Loktev DA, Illarionova LA, Loktev AA. Automation of the Behavioral Safety Audit of a Transport Operator Based on the Recognition of His Emotional State in Real Time. In: *Proc. 5th International Youth Conference on Radio Electronics, Electrical and Power Engineering (REEPE)*. New York City: IEEE; 2023. P. 1–5. <https://doi.org/10.1109/REEPE57272.2023.10086820>
8. Obukhov AD, Dedov DL, Surkova EO, Korobova IL. 3D Human Motion Capture Method Based on Computer Vision. *Advanced Engineering Research (Rostov-on-Don)*. 2023;23(3):317–328. <https://doi.org/10.23947/2687-1653-2023-23-3-317-328>
9. Sokolov SV, Marshakov DV, Reshetnikova IV. Optical Flow Parameter Identification in Vision Systems under Measurement Noise with Unknown Probabilistic Characteristics. *Advanced Engineering Research (Rostov-on-Don)*. 2026;26(1):2220. <https://doi.org/10.23947/2687-1653-2026-26-1-2220>
10. Hanae Moussaoui, Nabil El Akkad, Mohamed Benslimane, Walid El-Shafai, Abdullah Baihan, Chaminda Hewage, et al. Enhancing automated vehicle identification by integrating YOLO v8 and OCR techniques for high-precision license plate detection and recognition. *Scientific Reports*. 2024;14(1):14389. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-65272-1>
11. Kopalidis T, Solachidis V, Vretos N, Daras P. Advances in Facial Expression Recognition: A Survey of Methods, Benchmarks, Models, and Datasets. *Information*. 2024;15(3):135. <https://doi.org/10.3390/info15030135>
12. Lopes AT, de Aguiar E, De Souza AF, Oliveira-Santos T. Facial Expression Recognition with Convolutional Neural Networks: Coping with Few Data and the Training Sample Order. *Pattern Recognition*. 2017;61:610–628. <https://doi.org/10.1016/j.patcog.2016.07.026>

13. Sudha L, Vadhani R, Aruna KB, Sureka V, Sasikala V. Cutting-edge Facial Authentication System in Matlab (CFAS-M). In: *Proc. International Conference on Communication, Computing and Internet of Things (IC3IoT)*. New York City: IEEE; 2024. P. 1–6. <https://doi.org/10.1109/IC3IoT60841.2024.10550320>
14. Gonzalez R, Woods R. *Digital Image Processing*, 3rd ed. Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall; 2008. 1104 p.
15. Shan C, Gong S, McOwan PW. Facial Expression Recognition Based on Local Binary Patterns: A Comprehensive Study. *Image and Vision Computing*. 2009;27(6):803–816. <https://doi.org/10.1016/j.imavis.2008.08.005>

Об авторах:

Сергей Андреевич Филичкин, аспирант кафедры «Информационные системы» Ижевского государственного технического университета имени М.Т. Калашникова (426069, Российская Федерация, г. Ижевск, ул. Студенческая, 7), [SPIN-код](#), [ORCID](#), qwerty70@gmail.com

Сергей Валентинович Вологдин, доктор технических наук, доцент, заведующий кафедрой «Информационная безопасность» Ижевского государственного технического университета имени М.Т. Калашникова (426069, Российская Федерация, г. Ижевск, ул. Студенческая, 7), [SPIN-код](#), [ORCID](#), [ScopusID](#), [ResearcherID](#), vologdin_sv@mail.ru

Заявленный вклад авторов:

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

С.В. Вологдин: научное руководство, разработка концепции, разработка методологии, написание рукописи — внесение замечаний и исправлений.

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Декларация ИИ. Авторы заявляют, что при подготовке текста рукописи не использовались технологии генеративного искусственного интеллекта (ИИ), ИИ не является соавтором публикации: авторство присвоено только физическим лицам, внёсшим существенный интеллектуальный вклад в исследование.

About the Authors:

Sergey A. Filichkin, Postgraduate student of the Department of Information Systems, Kalashnikov Izhevsk State Technical University (7, Studencheskaya Str., Izhevsk, 426069, Russian Federation), [SPIN-code](#), [ORCID](#), qwerty70@gmail.com

Sergey V. Vologdin, Dr.Sci. (Eng.), Associate Professor, Head of the Information Security Department, Kalashnikov Izhevsk State Technical University (7, Studencheskaya Str., Izhevsk, 426069, Russian Federation), [SPIN-code](#), [ORCID](#), [ScopusID](#), [ResearcherID](#), vologdin_sv@mail.ru

Claimed Contributorship:

SA Filichkin: investigation, data curation, software, formal analysis, visualization, writing — original draft preparation.

SV Vologdin: supervision, conceptualization, methodology, 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.

AI Declaration. The authors declare that generative artificial intelligence (AI) technologies were not used in the preparation of the manuscript text and that AI is not a co-author of the publication: authorship is assigned only to natural persons who have made a substantial intellectual contribution to the research.

Поступила в редакцию / Received 11.05.2026

Поступила после рецензирования / Reviewed 15.06.2026

Принята к публикации / Accepted 25.07.2026

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



УДК 51-74

Оригинальное теоретическое исследование

<https://doi.org/10.23947/2687-1653-2026-26-3-2579>

Теоретико-множественный подход к разработке показателей оценки производственной и логистической деятельности промышленных предприятий

И.Д. Котляров  

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, г. Санкт-Петербург,
Российская Федерация, <https://ror.org/02x91aj62>

✉ ivan.kotliarov@mail.ru

EDN: VVAZPY

Аннотация

Введение. Устойчивое функционирование промышленного предприятия предполагает соответствие состава получаемых им ресурсов потребностям производства, а также ритмичность выпуска продукции на разных этапах производственной деятельности. Количественная оценка этих параметров должна производиться на основе соответствующих показателей. К сожалению, используемый в настоящее время набор метрик характеризуется неполнотой и наличием определенных методологических проблем. В частности, отсутствует показатель степени соответствия получаемых ресурсов потребностям предприятия, а используемый для оценки плановости производства коэффициент ритмичности не учитывает все факторы, влияющие на отклонение фактического выпуска продукции от плановых значений. Цель данного исследования заключается в разработке такого набора показателей, который определял бы соответствие фактических поставок текущим потребностям предприятия, а также более полно характеризовал бы ритмичность процесса выпуска продукции.

Материалы и методы. В исследовании был применен метод несистематизированного обзора источников для выявления проблем, характерных для используемых в настоящее время подходов к оценке производственной и логистической деятельности промышленного предприятия. Для синтеза показателей соответствия закупаемых ресурсов потребностям производства и определения ритмичности выпуска продукции использованы методы теории множеств. С теоретической точки зрения работа основана на методах построения мер сходства множеств, а также на теории организации производства.

Результаты исследования. Автором предложен интегральный показатель, позволяющий оценивать степень соответствия фактических поставок материальных ресурсов потребностям предприятия (с точки зрения номенклатуры и количества), и определен модифицированный коэффициент ритмичности производства. С помощью последнего проверяется согласованность фактического выпуска продукции с плановыми показателями, а также учитывается влияние сверхплановых объемов на ритмичность деятельности предприятия. В исследовании показано, что методика расчета модифицированного коэффициента ритмичности свободна от недостатков, характерных для ныне существующих подходов.

Обсуждение. Полученные в ходе исследования показатели носят универсальный характер. Они могут использоваться не только для оценки качества закупочной логистики предприятия, но и для анализа согласованности различных стадий производственного процесса, а также для оценки сотрудничества промышленного предприятия с внешними потребителями. Показано, что для улучшения соответствующих характеристик производственной и логистической деятельности предприятия большое значение имеет внедрение цифровых технологий. При этом полученные данные могут использоваться для обоснования целесообразности цифровой трансформации предприятия. Предложенные методики оценки соответствия фактических поставок потребностям предприятия и расчета модифицированного коэффициента ритмичности производства основаны на новом подходе к расчету индекса

Жаккара. Эта новая разновидность коэффициента Жаккара может быть названа нормализованным индексом Жаккара. Его следует использовать для оценки сходства тех дескриптивных множеств, для которых важно наличие качественных различий между элементами (в частности, разных размерностей). Такие множества предлагаются называть дескриптивными несмешиваемыми множествами.

Заключение. Разработанные автором показатели позволяют повысить качество оценки производственной и логистической деятельности промышленного предприятия, поскольку они дают возможность определять степень соответствия состава приобретаемых ресурсов потребностям производства, а также более полно учитывать влияние различных факторов на ритмичность выпуска продукции. Сформулированы рекомендации по использованию предложенных показателей для оценки качества производственной и логистической деятельности промышленных предприятий.

Ключевые слова: коэффициент ритмичности, бинарные меры сходства, индекс Жаккара, нормированный индекс Жаккара

Благодарности. Автор выражает благодарность редакции и рецензентам за внимательное отношение к статье и указанные замечания, устранение которых позволило повысить ее качество.

Для цитирования. Котляров И.Д. Теоретико-множественный подход к разработке показателей оценки производственной и логистической деятельности промышленных предприятий. *Advanced Engineering Research (Rostov-on-Don)*. 2026;26(3):2579. <https://doi.org/10.23947/2687-1653-2026-26-3-2579>

Original Theoretical Research

A Set-Theoretic Approach to Development of Performance Indicators for Production and Logistics Activities of Industrial Enterprises

Ivan D. Kotliarov 

Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, Saint Petersburg, Russian Federation, <https://ror.org/02x91aj62>

 ivan.kotliarov@mail.ru

Abstract

Introduction. Sustainable performance of an industrial enterprise implies that the structure of incoming resources corresponds to production requirements, along with the rhythm of output throughout the different phases of production activity. Quantitative assessment of these parameters should be based on relevant indicators. Unfortunately, the currently used set of metrics is incomplete and has certain methodological problems. Specifically, there is no indicator of the degree to which the resources received correspond to the needs of the enterprise, and the rhythmicity index used to assess the planned production does not take into account all the factors affecting the deviation of actual output from planned values. The objective of this study is to develop a set of indicators that would determine the conformance of actual supplies with the current needs of the enterprise, and would also more fully characterize the rhythm of the production process.

Materials and Methods. The study used a non-systematic review of sources to identify problems inherent in currently used approaches to assessing the production and logistics activities of an industrial enterprise. To synthesize indicators of conformance of purchased resources with production needs and determine the rhythm of production, set theory methods were used. From a theoretical perspective, the work is based on methods for constructing measures of similarity of sets, as well as on the theory of production organization.

Results. This paper proposes an integral indicator for assessing the degree to which actual material resource deliveries meet enterprise needs (in terms of product range and quantity). The paper also defines a modified rhythmicity index of production, which is used to verify the alignment of actual output with planned targets, while also accounting for the impact of above-plan volumes on the rhythm of the enterprise operations. The research demonstrates that the methodology for calculating the modified rhythmicity index is free from the shortcomings inherent in existing approaches.

Discussion. The indicators obtained in the course of the study are universal. They can be used not only to assess the quality of an enterprise procurement logistics, but also to analyze the consistency of various stages of the production process, as well as to evaluate the industrial enterprise cooperation with external customers. It has been shown that the implementation of digital technologies is of great importance for improving the relevant characteristics of the production and logistics activities of the enterprise. Moreover, the data obtained can be used to justify the feasibility of digital transformation of the enterprise. The proposed methods for assessing the conformance of actual supplies with enterprise needs and calculating the modified production rhythmicity index are based on a new approach to calculating the Jaccard index. This new version of the Jaccard index can be called the normalized Jaccard index. It should be used to assess the similarity of descriptive sets for which qualitative differences between elements (specifically, those of different dimensions) are of importance. These sets can be described as descriptive immiscible sets.

Conclusion. The indicators introduced in the present paper make it possible to improve the quality of assessment of the production and logistics activities of an industrial enterprise, as they make it possible to determine the extent to which the composition of acquired resources meets production needs and more fully account for the impact of various factors on the rhythm of production. Recommendations for using the proposed indicators to assess the quality of production and logistics activities of industrial enterprises are provided.

Keywords: rhythmicity index, binary similarity measures, Jaccard index, normalized Jaccard index

Acknowledgements. The author would like to thank the Editors and reviewers for their attentive attitude to the article and the specified comments that improved the quality of the article.

For citation. Kotliarov ID. A Set-Theoretic Approach to Development of Performance Indicators for Production and Logistics Activities of Industrial Enterprises. *Advanced Engineering Research (Rostov-on-Don)*. 2026;26(3):2579. <https://doi.org/10.23947/2687-1653-2026-26-3-2579>

Введение. Устойчивость и эффективность производственной деятельности промышленного предприятия в значительной степени определяется качеством ее ресурсного обеспечения и ритмичностью поставок материальных средств и выпуска продукции [1]. В частности, от этих факторов зависит возможность применения таких методов организации производства, как «точно в срок» и система Канбан [2]. Поэтому необходимо уделять пристальное внимание оценке этих параметров, а это требует использования определенного набора показателей [3]. Следует отметить, что такие показатели могут также использоваться для оценки качества работы служб, отвечающих за поставки материальных средств и за управление производственными процессами [4]. При этом необходимо иметь в виду, что фактическая номенклатура поставок и номенклатура фактических потребностей предприятия (или его подразделения, например, сервисного отдела, отвечающего за техническое обслуживание производственного оборудования) в течение определенного периода в общем случае не совпадают (как по составу позиций, так и по количеству материальных ресурсов каждого вида). Это несовпадение объясняется следующими причинами:

- разницей во времени от размещения заявки на приобретение материальных средств до их фактической поставки. К моменту получения ресурсов потребности предприятия (подразделения) в материальных средствах могут измениться (как по номенклатуре, так и по количеству отдельных видов ресурсов);
- организацией материально-технического обеспечения (МТО) подразделений предприятия на основе только нормативов или заранее составленных планов, без учета фактических потребностей;
- ошибками и сбоями в работе службы МТО предприятия и ее внешних поставщиков (срывы и задержки поставок, некомплект и т.д.). Поскольку эта служба занимается взаимодействием с внешними поставщиками, то к сфере ее ответственности относятся также и недостатки в их работе;
- ограничениями поставок иностранных ресурсов в текущей геополитической ситуации (как показывает опыт, могут замораживаться даже оплаченные заказы) [5].

Чем ниже уровень несовпадения номенклатуры поставок и потребностей предприятия, тем лучше предприятие и его подразделения обеспечены ресурсами и тем ниже риски нарушений устойчивости производственной деятельности. Это означает, что степень соответствия фактических поставок фактическим потребностям позволяет оценить как качество обеспечения предприятия необходимыми ему материальными средствами, так и качество деятельности службы МТО предприятия (в частности, ее способность прогнозировать потребности подразделений в ресурсах независимо от их заявок и учитывать эти прогнозы при размещении заказов у поставщиков, а также контролировать выполнение поставщиками их обязательств). Однако к настоящему времени проблемы, возникающие при количественной оценке этого соответствия, изучены недостаточно. Разумеется, при получении заказа от поставщика отдел МТО предприятия проводит проверку качества и количества доставленных материальных средств (для этого существуют соответствующие регламенты и стандарты). Однако такая проверка осуществляется по отдельным позициям, оценивается только конкретный ресурс в рамках конкретной поставки. По мнению автора, в этих ситуациях необходимо использовать комплексную методику, которая позволит дать общую оценку степени соответствия поставок потребностям предприятия.

Для оценки ритмичности производства и поставок чаще всего используется коэффициент ритмичности, определяемый различными методами [3], которым также присущи определенные недостатки. Например, при его расчете, как правило, не учитывается влияние выпуска сверхплановой продукции [6]. Это снижает ценность коэффициента ритмичности для оценки качества логистической (производственной) деятельности предприятия и, как следствие, для принятия управленческих решений. Эти проблемы указывают на необходимость совершенствования существующих методов определения ритмичности производства.

Таким образом, с учетом вышесказанного можно утверждать, что в настоящее время промышленные предприятия могут столкнуться с проблемами при оценке степени соответствия фактических поставок материальных средств фактическим потребностям и при определении уровня ритмичности производства. Данный факт позволяет говорить об актуальности задачи разработки научно-методического аппарата для более полной оценки характеристик логистической и производственной деятельности промышленных предприятий.

Необходимо отметить, что в настоящее время исследования по поводу решения отмеченных выше проблем фактически не проводятся. Известные автору публикации по организации логистических и производственных процессов можно разделить на четыре основных блока.

В первом рассматриваются проблемы оценки эффективности логистической и производственной деятельности. В нем можно выделить два основных направления. В рамках первого из них разрабатываются новые методики оценки эффективности логистической и производственной деятельности (как правило, либо путем совершенствования существующих методик за счет включения в них дополнительных параметров, например, гибкости производства [7], его экологичности [8], либо при помощи сложного математического аппарата для моделирования производственных и логистических процессов [9]). Второе направление представлено исследованиями по систематизации и критическому анализу существующих методик оценки производственной и логистической деятельности компаний [10]. Однако ни в одном из этих направлений не изучаются вопросы совершенствования методик расчета показателей плановости и ритмичности поставок и производства, а также разработки методов оценки соответствия фактических и плановых поставок.

Второй блок публикаций представлен исследованиями эффективности организации производства внутри предприятия или даже отдельного подразделения (или участка производства) [11], в т.ч. с применением современных информационных технологий [12, 13]. В работах, относящихся к этому блоку, затрагиваются проблемы оценки плановости и ритмичности производственной деятельности [14] (включая идентификацию факторов, которые влияют на ритмичность выпуска продукции [15]). Однако эти проблемы решаются на основе уже существующих показателей и методик [16]. Задача совершенствования методов оценки ритмичности поставок и производства не ставится. Не затрагиваются при этом и проблемы оценки соответствия фактических поставок фактическим потребностям.

Третий блок: управление цепочками поставок. В рамках этого блока можно выделить стратегическое и тактическое направления исследований. Тактическое связано в первую очередь с повышением эффективности текущей деятельности логистических цепочек [17]. Соответствующая задача требует наличия метрик для ее оценки [18], однако в их состав показатели соответствия поставок фактическим потребностям предприятия, а также ритмичности производства не входят. Речь здесь идет прежде всего о соблюдении сроков доставки [19] и об устойчивости цепочек поставок [20]. В работах, относящихся к стратегическому направлению, анализируются трансформации цепочек поставок с целью обеспечения их долгосрочной устойчивости [21]. Такая трансформация, в частности, может быть реализована на основе внедрения цифровых инструментов [22, 23] (включая технологии цифровых двойников [24], искусственного интеллекта [25] и блокчейна [26]). Большое значение имеет также активное использование природосберегающих (зеленых) технологий [27]. Важно подчеркнуть, что применение цифровых и энергосберегающих технологий и альтернативной энергетики не является отличительным признаком развития цепей поставок, оно соответствует общемировой тенденции развития экономических систем в условиях цифрового технологического уклада [28–30]. Наконец, в текущей ситуации специалисты много внимания уделяют проблемам обеспечения устойчивости глобальных цепочек поставок в условиях геополитической нестабильности [31]. Вопросы разработки методик оценки плановости поставок и их соответствия фактическим потребностям в данном направлении не представлены.

В четвертый блок входят публикации, связанные с разработкой комплексных информационно-аналитических систем [32] и алгоритмов [33] управления производственной деятельностью промышленного предприятия. Их авторы формируют перечни характеристик хозяйственной деятельности компании [33], на основе которых должно строиться управление (ритмичность производства может включаться в эти перечни [34]). Однако, как правило, не предлагают методик расчета показателей для оценки этих характеристик и не дают рекомендаций по совершенствованию существующих методик (поскольку речь идет о комплексной системе управления, а не об отдельных показателях). Соответствие фактических поставок фактическим потребностям в этот перечень не входит.

Автору удалось найти единственную работу, в которой была предпринята попытка оценить соответствие поставок ресурсов фактическим потребностям заказчика [35]. Важно отметить, что она относится к организации поставок в рамках системы материально-технического обеспечения Вооруженных сил Российской Федерации, где, очевидно, такое соответствие имеет стратегическое значение. Полученные результаты представляют несомненный интерес, однако выбранная методика оценки, по мнению автора, не позволяет в полной мере определить соответствие поставок потребностям.

Таким образом, можно сделать вывод, что в научной литературе существует пробел в знаниях о соответствии поставок материальных средств потребностям предприятий, который определяет цель данного исследования — разработка новых методик расчета степени соответствия фактических поставок материальных средств фактическим потребностям предприятий, а также определение оценки уровня ритмичности как поставок, так и выпуска продукции.

Материалы и методы. В работе были использованы следующие методы исследования и материалы:

– метод описательного обзора литературы для выявления текущего состояния исследований в области оценки степени соответствия фактических поставок ресурсов фактическим потребностям предприятия. Для этого автор обращался к публикациям в научных журналах, включенных в наукометрические базы РИНЦ и Scopus, а также на основополагающие работы по данной проблематике, в которых были заложены базовые подходы к разработке соответствующих показателей [36]. В ходе исследования был использован общенаучный метод анализа и синтеза;

– методы математического моделирования (в том числе с использованием аппарата теории множеств, прежде всего бинарных мер сходства множеств [37–39]).

Теоретической основой исследования послужила теория организации производства, прежде всего разработанные в ее рамках методы оценки ритмичности и плановости выпуска продукции [6].

Результаты исследования. Оценка соответствия фактических поставок ресурсов фактическим потребностям промышленного предприятия.

Для определения такой оценки были введены следующие обозначения:

F — множество ресурсов, поставляемых отделами, отвечающими за материально-техническое обеспечение предприятия; D — множество видов ресурсов, необходимых предприятию (подразделению).

С учетом сказанного выше совокупная потенциальная номенклатура поставок $M = F \cup D$ (в которую входят как фактически поставляемые службами МТО предприятия ресурсы, так и те виды материальных средств, которые необходимы компании, но при этом не включены в поставки) состоит из N видов материальных средств:

$$N = n(F) + n(D) - n(F \cap D) = n(F \cup D),$$

где n — мощность соответствующего множества.

Величина N может быть описана как совокупная номенклатура поставок и потребностей.

Пусть F_i — величина поставок i -го вида материальных средств, осуществляемых в течение определенного периода службами, отвечающими за материально-технического обеспечение компании, ($i \in 1, 2, \dots, N$), а D_i — величина фактических потребностей предприятия (подразделения) в ресурсах i -го вида за тот же период.

Очевидно, что оценить степень соответствия фактических поставок фактическим потребностям можно как по номенклатуре поставок, так и по количеству ресурсов каждого вида. Для оценки соответствия номенклатуры поставок можно использовать один из множества разработанных в настоящее время показателей степени сходства множеств [40]. Такой мерой сходства, в частности, выступает коэффициент Жаккара J [37, 38]. Формула для его расчета с учетом введенных ранее обозначений будет иметь следующий вид:

$$J = \frac{n(F \cap D)}{n(F \cup D)}. \quad (1)$$

Очевидно, что

$$0 \leq J \leq 1.$$

При $J = 1$ номенклатура фактических поставок полностью совпадает с номенклатурой фактических потребностей, тогда как при $J = 0$ имеет место полное несовпадение этих номенклатур.

Для оценки степени несоответствия фактической номенклатуры поставок фактическим потребностям можно использовать показатель несоответствия по номенклатуре JN :

$$JN = 1 - J = \frac{n(Q)}{N}, \quad (2)$$

где $Q = F \Delta D$ — множество видов ресурсов, фактические поставки которых не соответствуют фактическим потребностям предприятия.

Очевидно, что при $JN = 1$ номенклатура фактических поставок полностью не совпадает с номенклатурой фактических потребностей, тогда как при $JN = 0$ какие-либо отклонения этих номенклатур друг от друга по составу отсутствуют.

Однако условие $J = 1$ недостаточно для определения соответствия фактических поставок фактическим потребностям (и для оценки работы служб МТО предприятия как эффективной), поскольку в этом случае могут иметь место отклонения между фактическим объемом поставок ресурсов и фактическими потребностями в этих ресурсах. Таким образом, необходимо принимать во внимание величины потребностей и поставок конкретных видов ресурсов.

Однако, по мнению автора, с точки зрения способности подразделений МТО удовлетворять потребности предприятия несоответствие по номенклатуре может иметь большее значение, чем несоответствие по количеству поставок отдельных видов ресурсов. Несовпадение по номенклатуре указывает на то, что служба МТО не знакома с фактическими потребностями предприятия (или не готова их учитывать) или же на рынке отсутствует возможность поставки определенных позиций (т.е. устранение соответствующих затруднений может быть связано со значительными сложностями), тогда как несоответствие по количеству отдельных видов ресурсов означает, что имеют место отдельные частные проблемы с поставками, которые, как правило, могут быть достаточно оперативно решены.

Для определения степени соответствия фактических поставок и фактических потребностей по всем видам материальных средств можно также использовать альтернативный вариант коэффициента Жаккара JA для дескриптивных множеств (известный под названием коэффициента Ружички [41, 42]), который рассчитывается по следующей формуле [42]:

$$JA = \frac{\sum_{i=1}^N \min(F_i, D_i)}{\sum_{i=1}^N \max(F_i, D_i)}. \quad (3)$$

Однако недостатком этого альтернативного коэффициента Жаккара является то, что в нем, как показывает формула (3), не учитываются качественные различия между элементами множеств. Иными словами, единицы ресурсов различных видов принимаются равнозначными друг другу и учитываются совместно (в частности, во внимание не принимается то, что у разных видов ресурсов могут быть разные размерности), что искажает управленческий смысл полученного показателя. Данная проблема характерна и для других бинарных мер сходства множеств (коэффициент Серенсена и т.д.) [39]. Кроме того, коэффициент Жаккара может искажать оценку соответствия в силу того, что элементы с большими значениями сильнее влияют на него, чем элементы с меньшими значениями. Это можно проиллюстрировать следующим простым примером. Пусть промышленное предприятие заказало два вида материальных средств. Заказ по первому виду составил 500 единиц (допустим, штук), по второму — 4 единицы (допустим, тонны). Фактические поставки ресурса первого вида равны 500 единицам (штукам), а второго вида — 3 единицам (тоннам). Тогда значение альтернативного коэффициента Жаккара JA , рассчитанное по формуле (3), будет равно:

$$JA = \frac{500 + 3}{500 + 4} = 0,998.$$

Формально это довольно высокое значение, однако потребность предприятия в ресурсе второго вида удовлетворена только на 75 %, что формула (3) не учитывает. Фактически достаточное количество «штук» частично компенсировало нехватку «тонн». Полученный результат, очевидно, не имеет никакого смысла с точки зрения управления производственными и логистическими процессами ни в количественном, т.е. по значению показателя, ни в качественном, т.е. по возможности суммирования тонн и штук, аспекте. Таким образом, в случае значительных различий между количеством поставок разных видов ресурсов, измеряемых в разных единицах, использование формулы (3) может стать причиной неточной оценки соответствия. Это может привести к неправильным управленческим решениям [43] (в частности, в рамках приведенного выше условного примера полученное достаточно высокое значение показателя JA , скорее всего, не указывает на необходимость повышения качества организации материально-технического обеспечения предприятия).

Следует подчеркнуть, что предложенная в работе [35] методика оценки соответствия поставок и потребностей основана именно на формуле (3). По этой причине автор считает, что эта методика не в полной мере отражает данное соответствие.

Поэтому для оценки степени близости состава фактических поставок и фактических потребностей в ресурсах i -го вида автор предлагает использовать показатель соответствия IC_i :

$$IC_i = \frac{\min(F_i, D_i)}{\max(F_i, D_i)}. \quad (4)$$

Формула (4) может быть переписана в виде:

$$IC_i = \left(\frac{F_i}{D_i} \right)^{ID_i}, \quad (5)$$

где ID_i — коэффициент несоответствия поставок и потребностей по i -му виду материальных средств:

$$ID_i = \text{sign}(D_i - F_i),$$

где $\text{sign}(x)$ — функция «знак»:

$$\text{sign}(x) = \begin{cases} 1, & x > 0; \\ 0, & x = 0; \\ -1, & x < 0. \end{cases}$$

Формулы (4) и (5) эквивалентны, однако формула (5) удобна тем, что в ней в явном виде представлен характер несоответствия между фактическими потребностями и фактическими поставками, который описывается при помощи коэффициента несоответствия ID_i .

Формула (4) указывает на нежелательность поставок материальных средств сверх фактических потребностей, поскольку в этом случае предприятие может не суметь использовать их по назначению, но при этом будут отвлекаться ресурсы на хранение.

Очевидно, что:

$$0 \leq IC_i \leq 1.$$

При этом при $IC_i = 0$ имеет место полное несовпадение фактических поставок и фактических потребностей, тогда как при $IC_i = 1$ можно говорить об их полном совпадении. В частности,

$$IC_i = 0, \forall i \in Q. \quad (6)$$

Интегральный показатель соответствия TIC по N видам материальных средств автор предлагает рассчитывать по следующей формуле:

$$TIC = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N IC_i = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{\min(F_i, D_i)}{\max(F_i, D_i)}. \quad (7)$$

В отличие от формулы (3), в формуле (7) единицы ресурсов различных видов учитываются по отдельности. При этом с учетом условия (6) интегральный показатель соответствия TIC учитывает расхождение не только величин фактических потребностей и фактических поставок, но и несовпадение их номенклатуры. Для рассматриваемого условного примера значение интегрального показателя соответствия TIC будет равно

$$TIC = \frac{1}{2} \left(\frac{500}{500} + \frac{3}{4} \right) = 0,8875.$$

Иными словами, для этого условного примера $TIC < JA$. Таким образом, формула (7) позволяет точнее учесть как наличие в поставках разных видов ресурсов, так и отклонения фактических поставок от фактических потребностей независимо от величины этих потребностей и, как следствие, дает возможность принимать более эффективные управленческие решения.

Наконец, можно также предложить взвешенный интегральный показатель соответствия $WTIC$:

$$WTIC = \sum_{i=1}^N W_i IC_i, \quad (8)$$

где W_i — вес i -го вида материальных средств (с точки зрения их значимости для производственной деятельности предприятия, сложности хранения, доступности на рынке, стоимости и т. д.). Веса удовлетворяют следующему условию:

$$\sum_{i=1}^N W_i = 1.$$

Однако использование показателя $WTIC$ может быть затруднительным из-за сложности определения весов (в частности, из-за того, что в разные периоды времени один и тот же ресурс может иметь различное значение для предприятия, что делает процесс определения весов динамическим). Тем не менее, для задания величин весов на определенный период, продолжительность которого зависит от специфики деятельности предприятия и уровня стабильности его внешней среды, могут быть использованы следующие подходы:

- 1) метод экспертных оценок;
- 2) метод анализа иерархий [44];
- 3) прогрессия Фишберна (ее классическим вариантом является арифметическая прогрессия, однако А.В. Сигал рассматривает и другие способы ее задания [45]);
- 4) различные вариации ABC -метода (например, доля ресурса в совокупном количественном или стоимостном объеме закупок).

Эти веса, как было сказано выше, необходимо регулярно пересматривать.

Интересно отметить, что предложенный автором коэффициент несоответствия ID_i также может быть использован для оценки качества организации поставок. Для этого вводится интегральный коэффициент несоответствия IN :

$$IN = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |ID_i|. \quad (9)$$

Как и для всех предложенных выше показателей,

$$0 \leq IN \leq 1,$$

однако условие $IN = 0$ описывает ситуацию, при которой какие-либо отклонения между фактическими поставками и фактическими потребностями отсутствуют, тогда как при $IN = 1$ имеет место отклонение величин фактических поставок и фактических потребностей по всей номенклатуре поставок, это справедливо и для коэффициента несоответствия IN , формула (2). Интегральный коэффициент несоответствия не дает информации о величине этих отклонений, он лишь указывает на их существование и на их относительную долю в общей номенклатуре поставок.

Поскольку:

$$\sum_{i=1}^N |ID_i| = n(P),$$

где P — множество видов ресурсов, по которым наблюдается отклонение фактических поставок от фактических потребностей, то формулу (9) можно записать в виде:

$$IN = \frac{n(P)}{N} = \frac{n(P)}{n(M)}. \quad (10)$$

Очевидно, что предложенная методика может использоваться для оценки соответствия не только фактических поставок фактическим потребностям, но и фактических поставок плановым. В этом случае вместо величины D_i фактических потребностей в i -м ресурсе следует использовать величину O_i плановых поставок i -го ресурса.

Оценка ритмичности поставок ресурсов и выпуска продукции. Равномерность выполнения плана поставок ресурсов i -го вида (или плана производства продукции i -го вида), как правило, оценивается при помощи коэффициента ритмичности R_i , основная формула для определения которого имеет следующий вид:

$$R_i = \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m R_{ij}, \quad (11)$$

где m — число периодов, для которых определяется коэффициент ритмичности; R_{ij} — коэффициент ритмичности поставок (производства) i -го ресурса (продукта) в j -м периоде:

$$R_{ij} = \begin{cases} \frac{F_{ij}}{PS_{ij}}; & F_{ij} \leq PS_{ij}; \\ 1; & F_{ij} > PS_{ij}; \end{cases} \quad (12)$$

где F_{ij} — фактический объем поставок (выпуска) i -го вида ресурсов (продукции) в течение j -го периода; PS_{ij} — плановый объем поставок (объем производства) i -го вида материальных средств (продукции) в течение j -го периода.

При $R_i = 1$ имеет место полное соответствие фактических поставок плановым, тогда как при $R_i = 0$ полное несоответствие.

Формула (12) может быть переписана в следующем виде:

$$R_{ij} = \min\left(\frac{F_{ij}}{PS_{ij}}, 1\right) = \frac{\min(F_{ij}, PS_{ij})}{PS_{ij}}. \quad (13)$$

Числитель формулы (13) имеет очевидное сходство с формулой (4), однако знаменатель задан другим способом.

При расчете коэффициента ритмичности следует принимать во внимание только те виды материальных средств, поставки которых включены в план, т.е. те, для которых выполняется условие $i \in F$. Пусть $G = n(F)$, тогда интегральный коэффициент ритмичности R по всем G видам материальных ресурсов рассчитывается по формуле:

$$R = \frac{1}{G} \sum_{i=1}^G R_i. \quad (14)$$

Методика оценки ритмичности производства и поставок, основанная на формулах (11)–(14), обладает следующими недостатками:

– в соответствии с этой методикой превышение фактических поставок (или фактического объема производства) над плановыми не ведет к снижению значения коэффициента ритмичности (т.е. не оказывает отрицательного влияния на ритмичность и плановость производственных процессов), хотя на самом деле это не так. Поставки, осуществляемые сверх плана, ведут к росту нагрузки на производственную и транспортно-логистическую инфраструктуры предприятий, увеличивают издержки и создают риски утраты ресурсов и готовой продукции (в т.ч. из-за сложности организации хранения, невозможности своевременного использования их по назна-

чению и т. д.), а также ухудшают качество взаимодействия участников цепочки создания ценности. Эти негативные эффекты, по мнению автора, необходимо учитывать при оценке ритмичности производства. В научной литературе представлены попытки учесть сверхплановый выпуск продукции («перегруз плана») [3], однако при использовании методик, предлагаемых в этих работах, значение коэффициента ритмичности может превышать 1, что не соответствует описанным выше базовым ограничениям;

– при расчете коэффициента ритмичности не учитываются поставки (выпуск) тех видов ресурсов (продукции), закупки (производство) которых не предусмотрены планом. Формула (12) не позволяет включить эти виды ресурсов (продукции) в расчет коэффициента ритмичности, поскольку для них плановые объемы равны нулю. Тем не менее, наличие непланового выпуска влияет на коэффициент ритмичности, снижая его значение [46]. При этом производство продукции, не включенной в план, является сравнительно типичной ситуацией, обусловленной необходимостью адаптировать производственный план к фактическому спросу (как и поставки ресурсов, изначально не предусмотренных планом).

Таким образом, можно говорить о двух факторах, влияющих на значение коэффициента ритмичности:

- отклонение фактического выпуска предусмотренных планом видов продукции от плановых значений (в методике, представленной формулами (11)–(14), учитываются только отрицательные отклонения);
- выпуск неплановой продукции (не учитывается).

Необходимо отметить, что существует и альтернативный подход к определению коэффициента ритмичности поставок, который позволяет принять во внимание отрицательное влияние избыточных поставок на ритмичность [6]. В соответствии с этим подходом альтернативный коэффициент ритмичности RA_{ij} для i -го вида ресурсов в течение j -го периода рассчитывается по следующей формуле:

$$RA_{ij} = 1 - \frac{|F_{ij} - PS_{ij}|}{PS_{ij}}. \quad (15)$$

Альтернативный коэффициент ритмичности RA_i для m периодов определяется по формуле (11), а для всех видов материальных ресурсов — по формуле (14) с заменой в этих формулах стандартных коэффициентов ритмичности R_{ij} и R_i на альтернативные коэффициенты ритмичности RA_{ij} и RA_i соответственно.

Однако, хотя альтернативный коэффициент ритмичности RA_{ij} учитывает отрицательное влияние сверхплановых поставок на ритмичность, как показывает формула (15), при $F_{ij} > 2PS_{ij}$ он принимает отрицательные значения, что лишено явного управленческого смысла. Разумеется, формула (15) может быть преобразована к виду:

$$RA_{ij} = \begin{cases} 1 - \frac{|F_{ij} - PS_{ij}|}{PS_{ij}}, & F_{ij} \leq 2PS_{ij}; \\ 0, & F_{ij} > 2PS_{ij}, \end{cases} \quad (16)$$

но, в отличие от формулы (12), условие $F_{ij} > 2PS_{ij}$ также не обладает ясным управленческим смыслом и его теоретическое обоснование затруднительно.

Для оценки своевременности поставок (производства) i -го вида материальных средств (продукции) в течение j -го периода автор предлагает использовать модифицированный коэффициент ритмичности MR_{ij} :

$$MR_{ij} = \frac{\min(PS_{ij}, F_{ij})}{\max(PS_{ij}, F_{ij})}, \quad (17)$$

Формула (17) показывает, что, в отличие от стандартного коэффициента ритмичности поставок [3, 6], предлагаемый модифицированный коэффициент ритмичности учитывает тот факт, что превышение фактических поставок над плановыми отрицательно сказывается на ритмичности. При этом из формулы (17) следует, что больший объем фактических поставок, по сравнению с плановыми, оказывает меньшее отрицательное воздействие, чем сопоставимое по абсолютной величине невыполнение плана поставок (таблица 1). Такая асимметрия между влиянием недопоставок и избыточных поставок на ритмичность поставок не проектировалась при разработке модифицированного коэффициента ритмичности MR_{ij} , однако она хорошо отражает реальную специфику требований к организации производственной и логистической деятельности. Хотя избыточные поставки отрицательно влияют на логистические процессы (из-за необходимости, как было сказано выше, отвлекать дополнительные ресурсы на обслуживание сверхплановых материальных потоков), они могут быть связаны с компенсацией недопоставок за прошлые периоды. Кроме того, дополнительные объемы поставок (или производства, поскольку коэффициент ритмичности используется также для оценки плановости выпуска продукции) могут быть необходимы для ускоренного выполнения плана или для создания запаса на будущие периоды. Напротив, недопоставки (или невыполнение плана) могут стать причиной простоев производства и нарушения обязательств перед потребителями, что может привести к значительным финансовым потерям. В силу этого невыполнение плана можно считать оказывающим большее отрицательное воздействие на ритмичность производства, чем его перевыполнение. Это отражено в формуле (17), что, по мнению автора, может служить дополнительным подтверждением соответствия предлагаемой методики оценки ритмичности производства требованиям промышленных предприятий.

Формула (17) является дальнейшим развитием формул (12) и (13), при котором к виду, аналогичному формуле (4), приводится не только числитель формулы (13), но и ее знаменатель.

Кроме того, формула (17) позволяет рассчитывать модифицированный индекс ритмичности и для тех фактически произведенных (поставленных) видов продукции (ресурсов), выпуск (закупки) которых не был предусмотрен планом, значение модифицированного коэффициента ритмичности равно нулю в соответствии с формулой (17) в силу равенства нулю планового объема производства (заказа).

Иными словами, в формуле (17) устраняется неопределенность (деление на 0), возникающая в формуле (12) для продуктов (ресурсов), не включенных в план. При этом очевидно, что нулю может быть равен либо только плановый объем выпуска (заказа), либо только фактическая величина производства (закупок). Позиции, формально представленные в ассортименте предприятия, но не предусмотренные планом и реально не производящиеся, при расчете модифицированного коэффициента ритмичности не учитываются (это справедливо и для закупаемых ресурсов). Иными словами, коэффициент ритмичности, в соответствии с формулой (17) определяется для фактического выпуска продукции (объема закупок) и для составленного плана, а не для полной возможной номенклатуры продукции (поставок) предприятия.

Очевидно, что:

$$0 \leq MR_{ij} \leq 1. \quad (18)$$

При этом при $MR_i = 1$ все поставки (выпуск продукции) осуществляются своевременно, в соответствии с планом, тогда как при $MR_i = 0$ соблюдение плана поставок (выпуска) отсутствует. Таким образом, модифицированный коэффициент ритмичности обладает прозрачным управленческим смыслом, в отличие от подхода, представленного формулой (16).

При этом на значение модифицированного коэффициента ритмичности не налагается никаких искусственных ограничений — в отличие от формул (12) и (16). Иными словами, условие (18) выполняется в соответствии с методикой расчета, а не из-за целенаправленно заданных ограничений на значения показателей, что позволяет говорить о том, что он свободен от методических недостатков, присущих традиционным подходам к расчету коэффициента ритмичности.

Значения коэффициентов ритмичности, рассчитанные на основе различных методик, представлены в таблице 1.

Таблица 1

Значения коэффициентов ритмичности, рассчитанные на основе разных подходов

Выполнение плана поставок (производства), %	Коэффициент ритмичности, R_{ij}	Альтернативный коэффициент ритмичности, RA_{ij} , формула (13)	Альтернативный коэффициент ритмичности, RA_{ij} , формула (14)	Модифицированный коэффициент ритмичности, MR_{ij}
50	0,50	0,50	0,50	0,50
75	0,75	0,75	0,75	0,75
100	1,00	1,00	1,00	1,00
125	1,00	0,75	0,75	0,80
150	1,00	0,50	0,50	0,67
200	1,00	0	0	0,50
250	1,00	-0,50	0	0,40

Для расчета модифицированного коэффициента ритмичности MR_l для m периодов для l -го вида продукции использована следующая формула по аналогии с формулой (11):

$$MR_l = \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m MR_{ij} = \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m \frac{\min(PS_{ij}, F_{ij})}{\max(PS_{ij}, F_{ij})}. \quad (19)$$

Интегральный модифицированный коэффициент ритмичности IMR по всем видам ресурсов будет рассчитываться по аналогии с формулой (14) по следующей формуле:

$$IMR = \frac{1}{L} \sum_{l=1}^L MR_l, \quad (20)$$

где L — совокупное число видов продукции, фактически выпущенных предприятием в течение m периодов:

$$L = G + \left| \bigcup_{j=1}^m b_j \right|,$$

где b_j — количество видов продукции, не включенных в план производства, но фактически произведенных в течение j -го периода.

Формула (20) может использоваться как в базовом варианте, так и для оценки ритмичности производства только тех видов продукции, выпуск которых предусмотрен планом (в соответствии с традиционным подходом к оценке ритмичности производства). В этом случае количество видов изделий, для которых оценивается ритмичность производства, в формуле (20) следует принимать равным G , а не L .

Поскольку $L \geq G$, то предлагаемая автором методика позволяет учесть отрицательное влияние выпуска внеплановой продукции на ритмичность производства, в отличие от формулы (14). Подтвердить это можно при помощи условного примера (таблица 2).

Таблица 2

Условный пример для оценки ритмичности производства на основе разных подходов

Вид продукции	Изделие 1, шт.	Изделие 2, шт.	Изделие 3, шт.	Изделие 4, шт.
Плановый выпуск, период 1	100	200	0	0
Фактический выпуск, период 1	120	150	30	25
Плановый выпуск, период 2	100	200	0	0
Фактический выпуск, период 2	100	210	0	0
Плановый выпуск, период 3	100	200	0	0
Фактический выпуск, период 3	105	190	10	0
Плановый выпуск, период 4	100	200	0	0
Фактический выпуск, период 4	105	210	0	15

На основе данных таблицы 2 рассчитано три варианта индекса ритмичности (таблица 3):

1. традиционный вариант индекса ритмичности, формула (14), число видов продукции равно двум;
2. модифицированный индекс ритмичности для видов продукции, выпуск которых предусмотрен планом, формула (20), изделия 1 и 2;
3. модифицированный индекс ритмичности для всех выпускаемых видов продукции, формула (20), изделия 1, 2, 3 и 4.

Таблица 3

Значения интегрального коэффициента ритмичности, рассчитанные на основе традиционного и модифицированного подходов

Вариант коэффициента ритмичности	Интегральный коэффициент ритмичности	Интегральный модифицированный коэффициент ритмичности	Интегральный модифицированный коэффициент ритмичности
Число видов продукции	2	2	4
Значение	0,96	0,92	0,46

Как показывают данные таблицы 3, предлагаемая методика позволяет учитывать негативное влияние выпуска продукции, не предусмотренной планом, на ритмичность производства. В данном примере негативное влияние выпуска такой продукции существенно превосходит негативное влияние отклонения величины фактического выпуска продукции, предусмотренной планом, от плановых значений. Это объясняется тем, что слагаемые, соответствующие неплановой продукции в формуле (20), всегда равны 0, при этом они ведут к увеличению числа видов изделий L , т. е. к уменьшению множителя $1/L$. Таким образом, чем больше видов внеплановой продукции производится, тем ниже интегральный модифицированный коэффициент ритмичности.

С учетом формул (11), (17), (19) и (20) развернутая формула для расчета значения интегрального модифицированного коэффициента ритмичности может быть записана в следующем виде:

$$IMR = \frac{1}{L} \sum_{i=1}^L \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m \frac{\min(PS_{ij}, F_{ij})}{\max(PS_{ij}, F_{ij})}. \quad (21)$$

Формула (21) обобщает этапы определения значения интегрального модифицированного коэффициента ритмичности.

Связь предлагаемых показателей с бинарными мерами сходства дескриптивных множеств. Важно подчеркнуть, что формула (7) представляет собой не интуитивно понятный расчет среднего арифметического значений частных показателей соответствия IC_i (формула (4)), а альтернативный подход к расчету коэффициента Жаккара. Если рассмотреть выражение для расчета коэффициента Жаккара для дескриптивных множеств, формула (3), т.е. коэффициента Ружички, и пронормировать каждое слагаемое в его числителе и знаменателе по $\max(F_i, D_i)$:

$$\frac{\sum_{i=1}^N \min(F_i, D_i) / \max(F_i, D_i)}{\sum_{i=1}^N \max(F_i, D_i) / \max(F_i, D_i)} = \frac{\sum_{i=1}^N \min(F_i, D_i) / \max(F_i, D_i)}{N} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{\min(F_i, D_i)}{\max(F_i, D_i)}, \quad (22)$$

то легко убедиться в том, что формула (22) эквивалентна формуле (7). Таким образом, интегральный показатель сходства TIC для N видов построен по аналогии с коэффициентом Жаккара, рассчитанным для нормированных значений поставок отдельных видов ресурсов. Очевидно, что аналогичное рассуждение можно отнести и к модифицированному коэффициенту ритмичности MR_i , формула (19).

Формула (22) показывает связь предлагаемых показателей с классическими бинарными мерами сходства множеств. Сама формула (22) при этом представляет собой еще один подход к расчету коэффициента Жаккара наряду с его вариантами для булевых множеств (коэффициентом Танимото [47]), множеств с интервальными значениями элементов [48] и т.д. Иными словами, показатели соответствия и модифицированного индекса ритмичности входят в семейство коэффициентов Жаккара. Эта разновидность коэффициента Жаккара может быть названа коэффициентом Жаккара для дескриптивных множеств с нормированными значениями элементов (для краткости, хотя это и не совсем корректно с математической точки зрения, можно ее также назвать нормированным коэффициентом Жаккара). Ее следует применять для оценки сходства тех видов дескриптивных множеств, для которых важны качественные различия между входящими в них элементами (в частности, различия в единицах измерения). Иными словами, специфичность нормированного коэффициента Жаккара определяется не математической процедурой его расчета, а особенностями дескриптивных множеств, для сравнения которых он применяется (наличие качественных различий между элементами), это и обуславливает выбор способа расчета. Такие дескриптивные множества автор предлагает называть несмешиваемыми (из-за невозможности простого суммирования входящих в них элементов), в отличие от традиционно рассматриваемых дескриптивных множеств, для которых допустимо суммирование элементов (такие множества могут быть названы смешиваемыми).

В большинстве бинарных мер сходства дескриптивных множеств, которых на данный момент предложено значительное количество [37, 39], наличие качественных различий между элементами не учитывается, в силу чего при оценке сходства значения элементов суммируются (иными словами, речь идет исключительно о смешиваемых множествах). Напротив, в предлагаемой методике производится не интегральная (суммы минимальных и максимальных значений элементов), а покомпонентная (для каждой пары элементов сравниваемых множеств) оценка сходства, что позволяет учесть качественные различия элементов (т.е. специфику несмешиваемых множеств).

Эти качественные различия элементов не следует путать с качественными различиями шкал, в которых определяются значения элементов (номинальная, порядковая и т.д.). Учет этих различий шкал реализован в различных вариантах коэффициента Гауэра, в которых все шкалы сводятся к одной [37, 49]. Однако после этого сравнение множеств производится по методике, аналогичной расчету коэффициента Жаккара, т.е. путем суммирования значений элементов, приведенных к единой шкале.

Следует отметить, что нормирование значений элементов также проводится при расчете коэффициента Гауэра, однако процедура нормирования существенно отличается от предлагаемой автором (для коэффициента Гауэра используется разница между максимальным и минимальным значениями элементов), и она применяется исключительно для приведения качественно разных шкал к шкале одного типа [37, 49].

По мнению автора, это позволяет сделать вывод о том, что предлагаемая им разновидность коэффициента Жаккара, нормированный коэффициент Жаккара (22), представляет собой новую меру сходства дескриптивных множеств с качественно различающимися элементами. При этом связь предлагаемых показателей (показатель соответствия поставок и модифицированный коэффициент ритмичности) с бинарными мерами сходства множеств может рассматриваться в качестве теоретической основы разработанных методик оценки производственной и логистической деятельности промышленного предприятия.

Обсуждение. Интегральный показатель соответствия TIC (7) и интегральный модифицированный коэффициент ритмичности IMR (20) при их использовании для оценки качества работы системы подразделений, отвечающих за материально-техническое обеспечение предприятия (т.е. за организацию закупочной деятельности и входящей логистики), фактически представляют собой оценку обеспеченности подразделений компании материальными средствами по критериям номенклатуры и своевременности их поставки. Кроме того, эти показатели могут использоваться и для оценки производственной деятельности предприятия, поскольку их легко адаптировать для

определения степени соответствия номенклатуры и состава фактически произведенной продукции плановым значениям и для оценки ритмичности производства (для модифицированного коэффициента ритмичности *IMR* это показано непосредственно в описании методики его расчета). Наконец, их также можно применять для оценки степени соответствия фактических поставок, осуществляемых предприятием, запросам потребителей (в качестве которых могут выступать как внешние клиенты, так и следующие этапы производственной цепочки вертикально интегрированной компании), т.е. для определения качества функционирования исходящей логистики предприятия. Во втором случае речь идет об оценке качества взаимодействия между различными подразделениями внутри вертикально интегрированной структуры.

Таким образом, возможности использования предложенного автором набора показателей выходят за пределы оценки качества работы служб МТО предприятия и могут применяться на различных этапах производства. Руководство компании может осуществлять нормирование данных показателей.

Наряду с предложенными основными показателями оценки качества логистической и производственной деятельности промышленного предприятия (интегральный показатель соответствия *TIC* и интегральный модифицированный коэффициент ритмичности *IMR*) автором были также разработаны дополнительные показатели (продемонстрирована возможность использования коэффициента Жаккара *J* для оценки соответствия поставок по номенклатуре поставок (1), введен интегральный коэффициент несоответствия *IN* (7) и т.д., которые также могут использоваться для оценки функционирования компании. Это позволяет руководству предприятия (или его отдельных подразделений) выбирать оптимальный показатель с учетом текущих задач.

Сводный набор разработанных автором показателей представлен в таблице 4.

Таблица 4

Набор показателей для оценки логистической и производственной деятельности предприятия

Показатель	Формула для расчета	Комментарии
Коэффициент Жаккара, показатель соответствия номенклатуры поставок, <i>J</i>	$J = \frac{n(F \cap D)}{n(F \cup D)} = \frac{n(B)}{n(M)},$ формула (1)	Показывает соответствие номенклатуры фактических поставок ресурсов фактическим потребностям предприятия
Показатель несоответствия номенклатуры поставок, <i>JN</i>	$JN = 1 - J = \frac{n(Q)}{N},$ формула (2)	Определяет несоответствие номенклатуры фактических поставок фактическим потребностям предприятия
Интегральный показатель соответствия, <i>TIC</i>	$TIC = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N IC_i,$ формула (7)	Показывает соответствие фактических поставок фактическим потребностям предприятия по номенклатуре и количеству ресурсов
Взвешенный интегральный показатель соответствия, <i>WTIC</i>	$WTIC = \sum_{i=1}^n W_i IC_i,$ формула (8)	Позволяет оценить соответствие фактических поставок ресурсов фактическим потребностям предприятия с учетом значимости разных видов ресурсов
Интегральный коэффициент несоответствия, <i>IN</i>	$IN = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N ID_i = \frac{n(P)}{N},$ формулы (9) и (10)	Показывает долю видов ресурсов, по которым есть отклонения в объеме поставок от фактических потребностей, в совокупной номенклатуре поставок и потребностей
Интегральный модифицированный коэффициент ритмичности, <i>IMR</i>	$IMR = \frac{1}{L} \sum_{i=1}^L MR_i,$ формула (20)	Показывает степень соответствия объема поставок плановым значениям

Важной проблемой является разработка мероприятий по повышению значений этих показателей (т.е. по совершенствованию производственной и логистической деятельности компании). По мнению автора, одним из ключевых инструментов для решения этой задачи в условиях перехода к цифровому технологическому укладу служит цифровая трансформация предприятия на основе использования Интернета вещей, больших данных, предиктивной аналитики и искусственного интеллекта [50]. Эти технологии позволяют обеспечить контроль потребностей подразделений предприятия в ресурсах в режиме реального времени, прогнозировать перспективную величину потребностей и осуществлять гибкое планирование производственной и логистической деятельности [21] (в т.ч. с учетом сезонности [51]). Необходимо, однако, отметить, что производственная инфраструктура российской промышленности в настоящее время, по оценкам специалистов, характеризуется низким уровнем готовности к внедрению цифровых технологий [52].

Из сказанного выше и в соответствии с рекомендациями, представленными в работе [35], следует важный вывод, что предложенные автором показатели могут использоваться для оценки эффективности мероприятий по цифровой трансформации промышленного предприятия (или по внедрению цифровых технологий в его отдельные подразделения). Для этой цели можно рассчитать данные относительного увеличения интегрального показателя соответствия $TICG$ и интегрального модифицированного коэффициента ритмичности $IMRG$:

$$TICG = \frac{TIC_1}{TIC_0},$$

$$IMRG = \frac{IMR_1}{IMR_0},$$

где нижний коэффициент 0 соответствует значению показателя до проведения мероприятий по цифровой трансформации, а нижний коэффициент 1 — значению показателя после проведения данных мероприятий.

Очевидно, что должно выполняться условие

$$\begin{cases} TICG > 1; \\ IMRG > 1. \end{cases} \quad (23)$$

Условие (23) удобно тем, что оно характеризует цели цифровой трансформации промышленного предприятия.

Важным следствием (выходящим за пределы тематики данной статьи) является то, что предложенный метод расчета нормированного коэффициента Жаккара (22) представляет собой еще один подход к определению значения данного коэффициента (наряду с существующими методиками расчета коэффициента Жаккара для множеств с элементами, заданными в номинальной шкале [39], булевых множеств [53], данных с интервальной неопределенностью [48], вероятностной оценки [54] и т.д.) и позволяет оценивать сходство дескриптивных множеств, для которых принципиальное значение имеет наличие качественных различий между элементами.

Наконец, еще одним следствием, также выходящим за пределы целей данной статьи, но представляющим несомненный интерес, является разделение (насколько известно, ранее не представленное в литературе) дескриптивных множеств на смешиваемые и несмешиваемые. Существующие бинарные меры сходства дескриптивных множеств предлагались исключительно для смешиваемых множеств. Представленный автором нормированный коэффициент Жаккара позволяет оценивать сходство несмешиваемых множеств. Очевидно, что по аналогии (в соответствии с методикой Б.И. Семкина [39]) для несмешиваемых множеств могут быть введены и аналоги других мер сходства, разработанных для смешиваемых множеств (коэффициент Серенсена и т.д.).

Заключение. Проведенное автором исследование позволяет сформулировать следующие выводы:

- при оценке качества функционирования службы материально-технического обеспечения предприятия не следует ограничиваться учетом только фактических поставок материальных средств. Во внимание следует принимать полную номенклатуру поставок и потребностей, которая включает в себя также и те виды ресурсов, которые необходимы предприятию, но не входят в план поставок;
- автором предложен интегральный показатель соответствия фактических поставок фактическим потребностям, позволяющий решить важную задачу, которая ранее в целом не ставилась, а именно определить степень соответствия фактических поставок материальных ресурсов (по их номенклатуре и количеству отдельных видов материальных средств), осуществленных службой МТО компании в определенном периоде, фактическим потребностям предприятия (или его подразделения) в том же периоде;
- разработана методика расчета модифицированного коэффициента ритмичности, которая свободна от недостатков, характерных для существующих подходов к определению коэффициента ритмичности, поскольку в ней учитывается отрицательное влияние сверхплановых поставок на ритмичность и отсутствуют искусственные ограничения на значение показателя;
- показано, что обеспечить повышение значений предложенной автором оценки производственной и логистической деятельности промышленных предприятий можно на основе внедрения цифровых технологий, поскольку они способствуют росту качества планирования поставок и увеличению гибкости управления ими. При этом данные показатели могут быть также использованы для обоснования целесообразности проведения цифровой трансформации и для оценки величины полученного благодаря ей эффекта.

С теоретической точки зрения научная новизна данного исследования заключается в том, что для разработки методики расчета показателей производственной и логистической деятельности предприятия был применен аппарат теории множеств. Плановые и фактические объемы поставок и плановые и фактические объемы выпуска по всем видам продукции рассматривались как дескриптивные множества. Это позволяет перейти от интуитивных и эмпирических методик оценки ритмичности производства к теоретически обоснованному подходу. При этом автором был предложен альтернативный вариант коэффициента Жаккара (нормированный коэффициент Жаккара), который позволяет оценивать сходство тех дескриптивных множеств, для которых принципиальное значение имеет наличие качественных различий между элементами (для обозначения таких множеств может быть использован термин «дескриптивные несмешиваемые множества»).

Список литературы / References

1. Akbay Ü, Hafeez MS. Performance Outcomes of Supply Chain Management Practices: Evidence from Pakistan's Fan Manufacturing SMEs. *International Journal of Industrial Engineering and Management*. 2025;16(4):411–427. <https://doi.org/10.24867/ijiem-396>
2. Aldouri SNM. Digital Twin-Enabled Just-In-Time and Kanban Implementation Framework for Industry 4.0 Transformation in SMEs. *International Journal of Industrial Engineering and Management*. 2025;16(4):339–358. <https://doi.org/10.24867/ijiem-392>
3. Ilyina LA, Brazhnikov MA, Khorina IV. Formation of a Complex System of Indicators for Evaluation of Smooth Production Flow. In book: Popkova EG, Sukhova VE, Rogachev AF, Tyurina YG, Boris OA, Parakhina VN (eds). *Integration and Clustering for Sustainable Economic Growth. Contributions to Economics*. Cham: Springer; 2017. P. 495–506. https://doi.org/10.1007/978-3-319-45462-7_48
4. Barykin SE, Borisoglebskaya LN, Provotorov VV, Kapustina IV, Sergeev SM, De La Poza Plaza E, et al. Sustainability of Management Decisions in a Digital Logistics Network. *Sustainability*. 2021;13(16):9289. <https://doi.org/10.3390/su13169289>
5. Solari F, Lysova N, Romagnoli G, Montanari R, Bottani E. Insights from 20 Years (2004–2023) of Supply Chain Disruption Research: Trends and Future Directions Based on a Bibliometric Analysis. *Sustainability*. 2024;16(17):7530. <https://doi.org/10.3390/su16177530>
6. Kraynova EA, Andreev AF. *Organization of Production*. (In Russ.) Moscow: Nedra Publishers LLC; 2010. 250 p.
7. Lauren Van De Ginste L, El-Houssaine Aghezzaf, Johannes Cottyn. The Role of Equipment Flexibility in Overall Equipment Effectiveness (OEE)-driven Process Improvement. *Procedia CIRP*. 2022;107:289–294. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2022.04.047>
8. Domingo R, Aguado S. Overall Environmental Equipment Effectiveness as a Metric of a Lean and Green Manufacturing System. *Sustainability*. 2015;7(7):9031–9047. <https://doi.org/10.3390/su7079031>
9. Andrejić M. Measuring Efficiency in Logistics. *Military Technical Courier*. 2013;61(2): 84–104. <https://doi.org/10.5937/vojtehg61-1756>
10. Dmuchowski R. Methods of Measuring the Effectiveness of Logistics Activities. *Contemporary Economics*. 2021;15(3):309–320. <https://doi.org/10.5709/ce.1897-9254.45>
11. Kiridena S, Wenxu Li, Dwight R. Development and Validation of an Overall Equipment Efficiency Measurement Model for Supporting Operational Excellence. *IFAC-PapersOnLine*. 2022;55(10):3076–3081. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2022.10.201>
12. Singh R, Shah DB, Gohil AM, Shah MH. Overall Equipment Effectiveness (OEE) Calculation – Automation through Hardware & Software Development. *Procedia Engineering*. 2013;51:579–584. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2013.01.082>
13. Варламова С.А., Володина Ю.И., Затонский А.В., Язев П.А. Разработка имитационной модели для планирования горно-выемочных работ. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2019;10:214–222. <https://doi.org/10.25018/0236-1493-2019-10-0-214-222>
- Varlamova SA, Volodina YuI, Zatonkiy AV, Yazev PA. Simulation Model for Planning Mining Operations. *Mining Information and Analytical Bulletin*. 2019;10:214–222. <https://doi.org/10.25018/0236-1493-2019-10-0-214-222>
14. Жилинков А.А., Лагунова Ю.А. Математическая модель оценки грузопотоков асбестового горно-обогатительного комбината. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2025;(3):168–181. https://doi.org/10.25018/0236_1493_2025_3_0_168
- Zhilinkov AA, Lagunova YuA. Mathematical Model of Material Flow Analysis at Asbestos Mining and Processing Plant. *Mining Information and Analytical Bulletin*. 2025;(3):168–181. https://doi.org/10.25018/0236_1493_2025_3_0_168
15. Зорина Е.А., Мешков В.Г., Симанженков М.К. Автоматизированный анализ агрегированных показателей производственного процесса. *Вестник Тверского государственного технического университета. Серия: Технические науки*. 2025;2(26):87–93. <https://doi.org/10.46573/2658-5030-2025-2-87-93>
- Zorina EA, Meshkov VG, Simanzhenkov MK. Automated Analysis of Aggregated Product Process Indicators. *Herald of Tver State University. Series: Technical Sciences*. 2025;(2):87–93. <https://doi.org/10.46573/2658-5030-2025-2-87-93>
16. Хакулов В.А., Шаповалов В.А., Игнатов М.В. Исследование и совершенствование текущего управления ритмичностью работы интеллектуального комплекса экскаватор — автосамосвал в смежных экскаваторных работах. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2019;(S29):18–33.
- Khakulov VA, Shapovalov VA, Ignatov MA. Research and Improvement of the Current Management of the Rhythmicity Work the Intellectual Complex Excavator – Dump Truck in the Adjacent Open-Pit Excavator Faces. *Mining Information and Analytical Bulletin*. 2019;(S29):18–33.
17. Suvorova S, Kulikova O, Tropynina N. Designing a Sustainable Logistics Supply Chain. *E3S Web of Conferences*. 2021;284(1):04015. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202128404015>

18. Andrejić M. Modeling Retail Supply Chain Efficiency: Exploration and Comparative Analysis of Different Approaches. *Mathematics*. 2023;11(7):1571. <https://doi.org/10.3390/math11071571>
19. Rezvanov VK, Romakina OM, Zaytseva EV. Forecasting Delivery Time of Goods in Supply Chains Using Machine Learning Methods. *Advanced Engineering Research (Rostov-on-Don)*. 2025;25(2):120–128. <https://doi.org/10.23947/2687-1653-2025-25-2-120-128>
20. Magableh GM. A Developed Model for Measuring Supply Chain Nervousness, Using Fuzzy-DEMATEL to Analyze the Correlation Between Measurement Factors. *Systems*. 2025;13(11):1009. <https://doi.org/10.3390/systems13111009>
21. Trif R-C, Dumitrașcu O, Dumitrașcu D-D. Systematic Literature Review on Supply Chain Management: Technological Implications and Vulnerabilities. *Acta Technica Napocensis. Series: Applied Mathematics, Mechanics, and Engineering*. 2025;68(2–3S):1125–1134. URL: <https://atna-mam.utcluj.ro/index.php/Acta/article/view/2851> (дата обращения: 01.04.2026).
22. Kapustina I, Bakharev V, Barykin S, Kovalenko E. Digitalization of Logistics Hubs as a Competitive Advantage of Logistics Networks. *E3C Web of Conferences*. 2020;157:05009. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202015705009>
23. Ye Yuan, Zixin Xu., Jiacheng Liu, Jiang Yu, Yilan Li. Mapping the Future of Digital Logistics: A Multi-Layered Analysis of Technological Evolution and Integration. *International Journal of Systems Science: Operations & Logistics*. 2026;13(1):2676610. <https://doi.org/10.1080/23302674.2026.2676610>
24. Ivanov D, Dolgui A. A Digital Supply Chain Twin for Managing the Disruption Risks and Resilience in the Era of Industry 4.0. *Production Planning & Control*. 2021;32(9):775–788. <https://doi.org/10.1080/09537287.2020.1768450>
25. Culot G, Podrecca M, Nassimbeni G. Artificial Intelligence in Supply Chain Management: A Systematic Literature Review of Empirical Studies and Research Directions. *Computers in Industry*. 2024;162:104132. <https://doi.org/10.1016/j.compind.2024.104132>
26. Teodorescu M, Korchagina E. Applying Blockchain in the Modern Supply Chain Management: Its Implication on Open Innovation. *Journal of Open Innovation: Technology, Market, and Complexity*. 2021;7(1):80. <https://doi.org/10.3390/joitmc7010080>
27. Vertakova Yu, Kazantseva A, Plotnikov V. Green Supply Chain Management as a Tool for Transforming the Economy in the Transition to the Sustainable Development Concept. *Agricultural and Resource Economics*. 2020;6(2):37–56. <https://doi.org/10.51599/are.2020.06.02.03>
28. Barykin SE, Sergeev SM, Kapustina IV, Fedotov AA, Matchinov VA, De La Poza Plaza E, et al. Environmental Sustainability and Digital Transformation of Socio-Economic: Quality of Life Perspective. *Journal of Environmental Assessment Policy and Management*. 2023;25(01):2350001. <https://doi.org/10.1142/S1464333223500011>
29. Lapidus AA, Topchiy DV, Baulin AV, Yan J, Zhou B. Comprehensive Analysis of Digital Technology Applications in Construction Site Management. *Construction Materials and Products*. 2025;8(2):1. <https://doi.org/10.58224/2618-7183-2025-8-2-1>
30. Sheina SG, Fedorovskaya AA, Pirozhnikova AP, Wu Shixiao. Application of Vertical-Axis Wind Turbines for Environment-Friendly High-Rise Buildings Power Supply. *Construction Materials and Products*. 2025;8(3):2. <https://doi.org/10.58224/2618-7183-2025-8-3-2>
31. Смородинская Н.В., Катукоев Д.Д. Глобальные стоимостные цепочки: как поднять резильентность перед внезапными шоками? *Контуры глобальных трансформаций: политика, экономика, право*. 2020;13(6):30–50. <https://doi.org/10.23932/2542-0240-2020-13-6-2>
- Smorodinskaya NV, Katukov DD. Global Value Chains: How to Enhance Resilience under Sudden Shocks? *Outlines of Global Transformations: Politics, Economics, Law*. 2020;13(6):30–50. <https://doi.org/10.23932/2542-0240-2020-13-6-2>
32. Титов А.Б., Шепелева О.П., Кашин С.М., Антонова А.К. Информационно-аналитическое обеспечение управления предприятиями химической промышленности. *Экономические науки*. 2025;(244):664–671. <https://doi.org/10.14451/1.244.664>
- Titov AB, Shepeleva OP, Kashin SM, Antonova AK. Information and Analytical Support for the Management of Enterprises of the Chemical Industry. *Economic Sciences*. 2025;(244):664–671. <https://doi.org/10.14451/1.244.664>
33. Богомолов Б.Б., Болдырев В.С., Зубарев А.М., Мешалкин В.П., Меньшиков В.В. Интеллектуальный логико-информационный алгоритм выбора энергоресурсоэффективной химической технологии. *Теоретические основы химической технологии*. 2019;53(5):483–492. <https://doi.org/10.1134/S0040357119050026>
- Bogomolov BB, Zubarev AM, Meshalkin VP, Men'shikov VV, Boldyrev VS. Intelligent Logical Information Algorithm for Choosing Energy- and Resource-Efficient Chemical Technologies. *Theoretical Foundations of Chemical Engineering*. 2019;53(5):483–492. <https://doi.org/10.1134/S0040357119050026>
34. Дуболазов В.А., Симакова З.Л. Система оперативного контроля и регулирования производственных процессов на машиностроительных предприятиях. *Вестник Волжского университета им. В.Н. Татищева*. 2022;2(1):45–53. https://doi.org/10.51965/20767919_2022_2_1_45

Dubolazov VA, Simakova ZL. The System of Operational Control and Regulation of Production Processes at Machine-Building Enterprises. *Vestnik of Volzhsky University named after V.N. Tatishchev*. 2022;2(1):45–53. https://doi.org/10.51965/20767919_2022_2_1_45

35. Солодаев А.А. Военно-экономическое обоснование внедрения цифровых технологий в цепях поставок продукции военного назначения. *Актуальные проблемы военно-научных исследований*. 2025;(2(34)):46–53. URL: <https://scinetwork.ru/articles/60220#article--main> (дата обращения: 01.04.2026).

Solodaeve AA. Military-Economic Justification Introduction of Digital Technologies in Product Supply Chains Military Use. *Actual Problems of Military Scientific Research*. 2025;(2(34)):46–53. URL: <https://scinetwork.ru/articles/60220#article--main> (accessed: 01.04.2026).

36. Адамов В.Е. *Статистическое изучение ритмичности промышленного производства*. Москва: Статистика; 1965. 188 с.

Adamov VE. *Statistical Study of the Rhythm of Industrial Production*. (In Russ.) Moscow: Statistika; 1965. 188 p.

37. Levy A, Shalom BR, Chalamish M. A Guide to Similarity Measures and Their Data Science Applications. *Journal of Big Data*. 2025;12:188. <https://doi.org/10.1186/s40537-025-01227-1>

38. Rodionov IV, Sozontov AN. On Confidence Estimation Based on Quantitative Similarity Coefficients. *Automation and Remote Control*. 2020;81(2):320–332. <https://doi.org/10.1134/S0005117920020101>

39. Semkin BI. Elementary Theory of Similarity and Its Application in Biology and Geography: Multiple-site Measures of Similarity and Dissimilarity. *Pattern Recognition and Image Analysis*. 2015;25(1):1–9. <https://doi.org/10.1134/S1054661815010174>

40. Seung-Seok Choi, Sung-Hyuk Cha., Tappert CC. A Survey of Binary Similarity and Distance Measures. *Journal of Systemics, Cybernetics and Informatics*. 2010;8(1):43–48. URL: <https://www.iiisci.org/journal/pdv/sci/pdfs/g315jg.pdf> (дата обращения: 01.04.2026).

41. Constantinescu A. Similarity Measures for Numerical Data. Some Inequalities Concerning Ruzicka Similarity. *Ponte Academic Journal*. 2016;72(7):1–5. <http://doi.org/10.21506/j.ponte.2016.7.10>

42. Warrens MJ. Inequalities Between Similarities for Numerical Data. *Journal of Classification*. 2016;33:141–148. <https://doi.org/10.1007/s00357-016-9200-z>

43. Берштейн Л.С., Целых А.Н., Тимошенко Р.П. Методы принятия решения на основе мер сходства нечетких множеств, использующих интервальные оценки. *Известия ТРТУ*. 1999;3(13):14–18.

Bershtein LS, Tselykh AN, Timoshenko RP. Decision Making Methods Based on Similarity Measures of Fuzzy Sets Using Interval Estimates. (In Russ.) *Izvestiya TRTU*. 1999;(3):14–18.

44. Chiarini A. Choosing Action Plans for Strategic Manufacturing Objectives Using AHP. *Journal of Manufacturing Technology Management*. 2018;30(1):180–194. <https://doi.org/10.1108/JMTM-10-2017-0209>

45. Sigal AV. Using Fishburne's Sequences in Suitable Modeling Used for Sample Data. *Business Informatics*. 2021;15(4):50–60. <https://doi.org/10.17323/2587-814X.2021.4.50.60>

46. Полухин Г.А., Дьячков М.Е. Интеграция процесса изготовления единичных партий изделий в условиях серийного производства на машиностроительном предприятии. *Оборонный комплекс — научно-техническому прогрессу России*. 2025;(4):21–28. URL: http://izdat.ntckompas.ru/editions/for_readers/archive/article_detail.php?SECTION_ID=160&ELEMENT_ID=52195 (дата обращения: 01.04.2026).

Polukhin GA, Dyachkov ME. Integration of the Manufacturing Process for Small Batches in the Context of Serial Production at a Machine-Building Enterprise. *Defense Industry Achievements – Russian Scientific and Technical Progress*. 2025;(4):21–28. URL: http://izdat.ntckompas.ru/editions/for_readers/archive/article_detail.php?SECTION_ID=160&ELEMENT_ID=52195 (дата обращения: 01.04.2026).

47. Chung NCh, Miasojedow B, Startek M, Startek M, Gambin A. Jaccard/Tanimoto Similarity Test and Estimation Methods for Biological Presence-Absence Data. *BMC Bioinformatics*. 2019;20:644. <https://doi.org/10.1186/s12859-019-3118-5>

48. Баженов А.Н., Тельнова А.Ю. Обобщение коэффициента Жаккара для анализа данных с интервальной неопределённостью. *Измерительная техника*. 2022;(12):15–22. <https://doi.org/10.32446/0368-1025it.2022-12-15-22>

Bazhenov AN, Telnova AYU. Generalization of Jaccard Index for Interval Data Analysis. *Measurement Technique*. 2022;(12):15–22. <https://doi.org/10.32446/0368-1025it.2022-12-15-22>

49. Podani J, Schmera D. Generalizing Resemblance Coefficients to Accommodate Incomplete Data. *Ecological Informatics*. 2021;66:101473. <https://doi.org/10.1016/j.ecoinf.2021.101473>

50. Rajković T, Makajić-Nikolić D, Lečić-Cvetković D, Aničić N. The Most Commonly Used Industry 4.0 Technologies in Manufacturing: A Systematic Literature Review. *Advances in Production Engineering & Management*. 2025;20(4):507–528. <https://doi.org/10.14743/apem2025.4.555>

51. Тугашова Л.Г., Затонский А.В. Моделирование и прогнозирование производства нефтепродуктов с учетом сезонности на основе авторегрессионных моделей. *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. 2020;331(5):109–119. <https://doi.org/10.18799/24131830/2020/5/2641>

Tugashova LG, Zatonskiy AV. Modeling and Forecasting of Petroleum Products Production Taking into Account Seasonality on the Basis of Autoregressive Models. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*. 2020;331(5):109–119. <https://doi.org/10.18799/24131830/2020/5/2641>

52. Сулимов М.Ю. Цифровая трансформация в горнодобывающем секторе России: особенности и стратегические подходы. *Горная промышленность*. 2025;(4):104–108. <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2025-4-104-108>

Sulimov MYu. Digital Transformation in the Russian Mining Sector: Specific Features and Strategic Approaches. *Russian Mining Industry*. 2025;(4):104–108. (In Russ.) <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2025-4-104-108>

53. Bădică A, Bădică C, Logofătu D, Ionuț-Dragoș N. Generalizations and Properties of Normalized Similarity Measures for Boolean Models. *Mathematics*. 2025;13(3):384. <https://doi.org/10.3390/math13030384>

54. Dabić M, Stojanović N, Ikodinović N. A Logic with Probabilistic Jaccard Similarity. *Journal of Logic and Computation*. 2026;36(2):exag004. <https://doi.org/10.1093/logcom/exag004>

Об авторе:

Иван Дмитриевич Котляров, кандидат экономических наук, доцент Высшей школы сервиса и торговли Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого (194021, Российская Федерация, г. Санкт-Петербург, ул. Новороссийская, 50), [SPIN-код](#), [ORCID](#), [ScopusID](#), [ResearcherID](#), [ResearchGate](#), ivan.kotliarov@mail.ru

Конфликт интересов: автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Автор прочитал и одобрил окончательный вариант рукописи.

Декларация ИИ: автор заявляет, что при подготовке текста рукописи не использовались технологии генеративного искусственного интеллекта (ИИ), ИИ не является соавтором публикации: авторство присвоено только физическому лицу, внёсшим существенный интеллектуальный вклад в исследование.

About the Author:

Ivan D. Kotliarov, Cand.Sci. (Economics), Associate Professor of the Graduate School of Service and Trade, Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University (50, Novorossiyskaya Str., Saint Petersburg, 194021, Russian Federation), [SPIN-code](#), [ORCID](#), [ScopusID](#), [ResearcherID](#), [ResearchGate](#), ivan.kotliarov@mail.ru

Conflict of Interest Statement: the author declares no conflict of interest.

The author has read and approved the final version of manuscript.

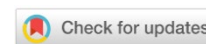
AI Declaration: The author declares that generative artificial intelligence (AI) technologies were not used in the preparation of the manuscript text and that AI is not a co-author of the publication: authorship is assigned only to natural persons who have made a substantial intellectual contribution to the research.

Поступила в редакцию / Received 20.04.2026

Поступила после рецензирования / Reviewed 28.05.2026

Принята к публикации / Accepted 18.06.2026

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



УДК 681.5

Оригинальное эмпирическое исследование

<https://doi.org/10.23947/2687-1653-2026-26-3-2590>

Оптимизация функций управления адаптивной беговой платформой для систем опорно-двигательной реабилитации

А.А. Волков , М.А. Дудин , Д.Л. Дедов , А.Д. Обухов

Тамбовский государственный технический университет, г. Тамбов,

Российская Федерация, <https://ror.org/04wegbp55> Obuhov.art@gmail.com

EDN: ZAUDNY

Аннотация

Введение. Восстановление самостоятельной ходьбы требует реабилитационных средств, позволяющих интенсивно тренироваться, не ограничивая естественную вариабельность движений. Большинство исследователей рассматривают до трех показателей процесса, причем в одном измерительном контуре. Фиксируются, например, точность оценки скорости и положения, характеристики шага, сила реакции опоры, субъективная оценка пользователя. Такой подход препятствует прямому сопоставлению и обоснованному выбору функций управления. Мало изучена параметрическая оптимизация линейной, нелинейной и ПИД-функций по интегральному критерию, который учтет устойчивость, длительность и амплитуду переходных процессов, микродинамику слежения и субъективный комфорт. Этот пробел восполняет данная работа. Цель исследования — экспериментальное сравнение и параметрическая оптимизация линейной, нелинейной и ПИД-функций управления адаптивной беговой платформой при использовании VR¹ и CV².

Материалы и методы. Экспериментальный стенд интегрировал беговую платформу и две системы отслеживания: VR и CV. Процессы оценивали по интегральному критерию качества с 9 параметрами (метрики позиционной стабильности, динамики разгона, микродинамики слежения и субъективной оценки). Устойчивость интегрального критерия к экспертному назначению весов определили по чувствительности. В каждой из 1000 итераций весовые коэффициенты меняли в пределах $\pm 20\%$ от исходных и повторно нормировали, чтобы сумма оставалась равной единице. Для выбора параметров функций задействовали 5 здоровых мужчин, для итогового сравнения функций — 10. В 165 экспериментах получили 495 валидных записей.

Результаты исследования. Определены условия получения наименьших значений интегрального критерия:

- для CV — нелинейная функция с критерием 2,683;
- для VR — линейная функция с критерием 2,002.

При использовании линейной функции переход от CV к VR сопровождается снижением критерия на 30,3 %, с 2,874 до 2,002. Предпочтительная функция управления определяется характеристиками системы отслеживания положения пользователя. Применение VR-трекеров дает статистически значимые различия между линейной и нелинейной функциями ($p < 0,001$), а также между линейной и ПИД-функциями ($p = 0,0020$). Различие нелинейной и ПИД-функций — ниже уровня статистической значимости ($p = 0,0574$). Для CV не выявили статистически значимых различий совокупных профилей ($p = 0,1407–0,5664$).

¹ От англ. virtual reality — виртуальная реальность.

² От англ. computer vision — компьютерное зрение.

Обсуждение. Для контура с VR в качестве базовой рекомендуется линейная функция с метровой рабочей зоной, для CV — нелинейная с рабочей зоной 0,75 м и коэффициентом нелинейности 0,3. Однако превосходство одного из этих вариантов не доказано из-за близкого значения ПИД-функции и частичного изменения рангов при варьировании весов. Функции демонстрируют стабильность и физиологически безопасную латентность (менее 100 мс). Из-за ограничений исследования (малый объем выборки и участие только здоровых добровольцев) итоги работы рассматриваются как часть предварительной инженерной валидации, настройки адаптивных беговых платформ.

Заключение. Обоснованы рекомендации по выбору функций управления и систем отслеживания для адаптивных беговых платформ в системах опорно-двигательной реабилитации. В перспективе предложенные параметры будут проверены на большей выборке, включающей пациентов с нарушениями походки. Планируется проработка индивидуальной настройки управления по данным первых минут движения на платформе.

Ключевые слова: восстановление самостоятельной ходьбы, адаптивная беговая платформа, оценка комфорта адаптивной платформы, позиционная стабильность, динамика разгона, микродинамика слежения

Благодарности. Авторы выражают благодарность сотрудникам лаборатории VR-тренажеров «Тамбовский государственный технический университет» за участие в подготовке и проведении экспериментов.

Финансирование. Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ в рамках проекта «Разработка медицинских VR-тренажерных систем для опорно-двигательной реабилитации с биологической обратной связью» (№ 124032800018-5) <https://gisnauka.ru/nioctr/detail/5QR64MDJQ5UID85HB27LPML8>

Для цитирования. Волков А.А., Дудин М.А., Дедов Д.Л., Обухов А.Д. Оптимизация функций управления адаптивной беговой платформой для систем опорно-двигательной реабилитации. *Advanced Engineering Research (Rostov-on-Don)*. 2026;26(3):2590. <https://doi.org/10.23947/2687-1653-2026-26-3-2590>

Original Empirical Research

Optimization of Control Functions of an Adaptive Treadmill Platform for Musculoskeletal Rehabilitation Systems

Andrey A. Volkov , Maxim A. Dudin , Denis L. Dedov , Artem D. Obukhov  

Tambov State Technical University, Tambov, Russian Federation, <https://ror.org/04wegbp55>

 Obuhov.art@gmail.com

Abstract

Introduction. Restoring independent walking requires rehabilitation aids that enable intensive training while preserving the natural variability of movement. Most researchers typically examine no more than three process-related indicators, all within a single measurement loop. These parameters include, for example, the accuracy of speed and position assessment, gait parameters, ground reaction force, and the user's subjective assessment. This approach hinders direct comparison and sound selection of control functions. Parametric optimization of linear, nonlinear, and PID functions using an integral criterion, which takes into account stability, duration, and amplitude of transient processes, tracking microdynamics, and subjective comfort, has been little studied. This research fills the gap. The objective of the study is an experimental comparison and parametric optimization of linear, nonlinear and PID control functions of an adaptive treadmill platform using virtual reality (VR) and computer vision (CV).

Materials and Methods. The experimental setup integrated a treadmill platform and two tracking systems: VR and CV. The processes were evaluated using an integrated quality criterion with nine parameters (position stability metrics, acceleration dynamics, tracking microdynamics, and subjective assessment). The robustness of the integrated criterion to expert weight assignment was determined by sensitivity. In each of the 1000 iterations, the weight coefficients were varied within $\pm 20\%$ of the initial values and re-normalized to maintain a sum equal to one. Five healthy male subjects were used to select the function parameters, and 10 male subjects were used for the final function comparison. A total of 495 valid records were obtained from 165 experiments.

Results. The conditions for obtaining the minimum values of the integral criterion were determined:

– for CV – a nonlinear function with a criterion of 2.683;

– for VR – a linear function with a criterion of 2.002.

When using a linear function, the transition from CV to VR was accompanied by a 30.3% decrease in the criterion, from 2.874 to 2.002. The preferred control function was determined by the characteristics of the user position tracking system. The application of VR trackers yielded statistically significant differences between the linear and nonlinear functions ($p < 0.001$), as well as between the linear and PID functions ($p = 0.0020$). The difference between the nonlinear and PID functions was below the level of statistical significance ($p = 0.0574$). For CV, no statistically significant differences were found in the combined profiles ($p = 0.1407$ – 0.5664).

Discussion. For the VR-based loop, a linear function with a 1-meter working area is recommended as the baseline. For the CV-based loop, a nonlinear function with a working area of 0.75 m and a nonlinearity coefficient of 0.3 is recommended. However, the superiority of one of these options has not been proven due to the close value of the PID function and a partial change in ranks when varying the weights. The functions demonstrate stability and physiologically safe latency (less than 100 ms). Due to study limitations (small sample size and only healthy volunteers), the research results are considered part of the preliminary engineering validation and tuning of adaptive treadmill platforms.

Conclusion. Recommendations are provided for selecting control functions and tracking systems for adaptive treadmill platforms used in musculoskeletal rehabilitation. The proposed parameters are to be validated on a larger sample, including patients with gait disorders. Future work will also address the development of individualized control tuning based on data acquired during the initial minutes of walking on the platform.

Keywords: restoration of independent walking, adaptive treadmill platform, adaptive platform comfort assessment, position stability, acceleration dynamics, tracking microdynamics

Acknowledgments. The authors would like to thank the staff of the VR Training Systems Laboratory, Tambov State Technical University, for their contribution to the preparation and performance of the experiments.

Funding Information. The research is done with the financial support from the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation within the framework of the project “Development of Medical VR Training Systems for Musculoskeletal Rehabilitation with Biofeedback” (Project No. 124032800018-5) <https://gisnauka.ru/nioktr/detail/5QR64MDJQ5UID85HB27LPML8>

For Citation. Volkov AA, Dudin MA, Dedov DL, Obukhov AD. Optimization of Control Functions of an Adaptive Treadmill Platform for Musculoskeletal Rehabilitation Systems. *Advanced Engineering Research (Rostov-on-Don)*. 2026;26(3):2590. <https://doi.org/10.23947/2687-1653-2026-26-3-2590>

Введение. Восстановление самостоятельной ходьбы — одна из основных задач реабилитации пациентов с заболеваниями и травмами опорно-двигательного аппарата, последствиями инсульта и другими поражениями центральной нервной системы [1]. В 2019 году в мире насчитывалось 2,41 млрд человек с состояниями, при которых реабилитационные мероприятия могли принести положительный эффект, у 1,71 млрд из них были заболевания опорно-двигательного аппарата [2]. Эта статистика учитывает широкий спектр нарушений и отражает глобальную потребность в доступных технических средствах, позволяющих многократно и безопасно выполнять двигательные упражнения [3]. Отметим, однако, что по приведенным цифрам можно лишь очень приблизительно судить о количестве пациентов, нуждающихся в восстановлении именно ходьбы [4].

Для двигательной реабилитации применяются роботизированные комплексы, экзоскелеты и беговые платформы с системами разгрузки массы тела и биологической обратной связи [5]. Традиционные роботизированные комплексы и экзоскелеты, жестко фиксирующие конечности пациента, способны обеспечить требуемую высокую интенсивность тренировочного процесса [6], однако они ограничивают естественную кинематическую вариабельность походки. Данный существенный недостаток в долгосрочной перспективе критически снижает эффективность переноса заново сформированных двигательных навыков на повседневную независимую ходьбу [4]. По этой причине в реабилитационной практике применяются беговые платформы (дорожки), интегрированные в сложные комплексы с системами разгрузки веса и модулями биологической обратной связи в виртуальной реальности [4]. Большинство платформ работают в режиме фиксированной скорости, которую оператор задает вручную, т.е. фактически навязывает пациенту строго заданный ритм шага. В таких условиях беговая дорожка искажает естественную линейную и нелинейную динамику вариабельности шага. Пациент вынужден непрерывно подстраивать свою биомеханику под движение полотна, вместо того чтобы полотно адаптировалось под его текущие намерения, возможности или усталость.

Для преодоления этого ограничения активно разрабатываются адаптивные беговые платформы [7]. Они могут в режиме реального времени, с минимальной латентностью подстраивать скорость движения бегового полотна под кинематические и пространственные характеристики пользователя. Центральные проблемы создания адаптивных беговых платформ — синтез и параметрическая оптимизация алгоритмов управления (контроллеров). Они должны, с одной стороны, гарантировать быструю и адекватную реакцию системы на изменение скорости пользователя, а с другой — поддерживать стабильность, минимизировать рывки и предотвращать потерю равновесия тела. Избыточно высокая чувствительность контроллера приведет к высокочастотным изменениям скорости полотна и, как следствие, увеличит пространственно-временную вариабельность шага. Недостаточная чувствительность и высокая инертность алгоритма, напротив, вызывают значительное продольное пространственное смещение человека. Итогом в данном случае может быть выход пациента за пределы безопасной рабочей зоны дорожки.

Преимущества управления скоростью полотна самим пользователем подтверждаются экспериментальными исследованиями. Авторы [8] сравнили фиксированный и адаптивный режимы у 18 пациентов с хроническими последствиями инсульта. При адаптивном управлении ширина шага составила 13,7 см, а при фиксированной скорости — 16,8 см. Расхождение оказалось статистически значимым ($p < 0,0001$). Длина и продолжительность

шага между режимами существенно не различались. Полученные результаты свидетельствуют о том, что способ управления скоростью может менять отдельные биомеханические характеристики ходьбы даже при сопоставимой средней скорости движения [8].

В литературе описаны различные способы формирования управляющего воздействия для согласования скорости полотна с самостоятельно выбираемым темпом ходьбы. В [9] оценивалась скорость пользователя по максимальной скорости переноса стопы. После дополнительной обработки данных средняя ошибка оценки скорости сократилась до 0,0663 м/с, или приблизительно на 51 % [9]. Ограничение такого подхода связано с необходимостью регистрации движения стопы и предварительной настройки регулятора под характеристики пользователя. Авторы [10] применили данные силовых платформ и фильтр Калмана для оценки скорости и положения человека. Среднеквадратические расхождения относительно оптической системы захвата движений составили 0,023 м/с для скорости и 0,014 м для положения, а результаты измерения самостоятельно выбираемой скорости имели корреляцию более 0,93 с результатами теста ходьбы на 10 м. При высокой точности такой измерительный контур требует достаточно сложной и дорогостоящей беговой платформы.

Опубликованы исследования по управлению скоростью на базе тензометрических датчиков, однако внедрение таких систем в массовую клиническую практику крайне ограничено из-за их высокой стоимости и технической сложности калибровки [11]. Более доступная альтернатива — использование кинематических данных (положения и скорости проекции центра масс), получаемых с помощью систем оптического или инерциального трекинга [12]. Системам компьютерного зрения достаточно видеокамеры, нет необходимости закреплять датчики на пользователе. Однако точность и устойчивость в данном случае зависят от частоты съемки, освещенности, положения камеры, окклюзий и алгоритма распознавания позы [13]. Сопоставление этих подходов особенно важно для управления беговой платформой, поскольку различия в дискретности, латентности и уровне шумов исходных координат непосредственно передаются в систему управления [14].

При разработке беговых платформ используются линейные, нелинейные, зональные, пропорционально-дифференциальные и пропорционально-интегрально-дифференцирующие (ПИД) функции управления [15]. Выбор функции и ее параметров во многом зависит от аппаратной реализации платформы, длины рабочей зоны, системы отслеживания и требований к безопасности пользователя. Система управления должна не только удерживать человека в рабочей зоне, но и сглаживать переходные процессы, обеспечивать плавное изменение скорости полотна и сохранение равновесия.

В предшествующем исследовании [15] авторы сравнили шесть функций управления при использовании VR-трекеров и компьютерного зрения. Указанная работа имела характер первичного сравнительного отбора и не решала задачу последовательной параметрической оптимизации основных функций по единому критерию, учитывающему переходные и стационарные характеристики системы.

Анализ литературы показывает, что большинство исследований проводится в заранее выбранном измерительном контуре. В одних работах основные показатели — точность оценки скорости и положения, в других — пространственно-временные характеристики шага, силы реакции опоры либо субъективная оценка пользователя. Различие экспериментальных протоколов и критериев не позволяет напрямую сопоставлять функции управления и обоснованно выбирать их коэффициенты. Недостаточно изучена задача параметрической оптимизации линейной, нелинейной и ПИД-функций по единому интегральному критерию с последующим сравнением оптимизированных конфигураций при различных способах отслеживания положения пользователя. Такой критерий должен одновременно учитывать позиционную устойчивость, длительность и амплитуду переходных процессов, микродинамику слежения и субъективный комфорт.

Цель настоящего исследования заключалась в экспериментальном сравнении и параметрической оптимизации линейной, нелинейной и ПИД-функций управления адаптивной беговой платформой при использовании VR-трекеров и системы компьютерного зрения. Для достижения поставленной цели решались пять задач.

1. Разработка методики экспериментального сравнения функций управления и интегрального критерия оптимальности, основанного на минимизации совокупной оценки позиционной устойчивости, переходных процессов, микродинамики слежения и субъективного комфорта.
2. Параметрическая оптимизация линейной, нелинейной и ПИД-функций управления в соответствии с разработанным критерием.
3. Сравнение выбранных конфигураций функций в двух измерительных контурах — на основе VR-трекеров и компьютерного зрения.
4. Определение предпочтительных сочетаний функции управления и системы отслеживания.
5. Установка границы применимости полученных инженерных рекомендаций.

Научная новизна исследования заключается в разработке процедуры параметрической оптимизации функций управления адаптивной беговой платформой по интегральному критерию, объединяющему показатели позиционной устойчивости, переходных процессов, микродинамики слежения и субъективного комфорта, а также в установлении предпочтительных параметров линейной, нелинейной и ПИД-функций для двух измерительных контуров.

Практическая значимость работы связана с формированием исходных параметров и рекомендаций по выбору функции управления для систем на основе VR-трекеров и компьютерного зрения.

Материалы и методы. На первом этапе исследования рассматривались аппаратное обеспечение и общая архитектура системы управления адаптивной беговой платформой. Для экспериментов использовали адаптивную беговую платформу собственной разработки «Тамбовский государственный технический университет» (Тамбов, Российская Федерация). Система управления объединяет беговую платформу, средства определения положения пользователя, модуль предварительной обработки координат, программный модуль формирования управляющего воздействия, управляющий микроконтроллер и силовой привод полотна. На основании текущей координаты пользователя программный модуль рассчитывал требуемую скорость полотна и передавал соответствующую команду контроллеру привода. Мощность сервопривода — 1,5 кВт. Двигатель управлялся с помощью драйвера, соединенного с микроконтроллером ESP32. Скорость полотна определялась по данным энкодера. Важная особенность платформы — отсутствие поручней. Это устранило преграды для компьютерного зрения и повысило качество оценки постуральной устойчивости, т.к. анализировались движения человека без компенсации положения за счет опоры руками.

Ключевые технические характеристики экспериментальной платформы:

- общая физическая длина бегового полотна — 2,58 м (рабочая зона — 2,4 м);
- эффективная ширина бегового полотна — 0,9 м;
- максимальное физическое ускорение привода — 2,5 м/с².

Отметим, что платформа способна развивать скорость до 5,5 м/с, однако в рамках эксперимента показатель программно ограничили значением 2,0 м/с. Это обусловлено требованиями безопасности и соответствует быстрому шагу, т.е. подходит для большинства сценариев опорно-двигательной реабилитации.

В исследовании использовались две системы отслеживания [16]. Первая (S1) — набор датчиков виртуальной реальности HTC Vive Tracker 3.0 (HTC Corporation, Тайвань) с частотой записи 60 Гц при погрешности позиционирования менее 0,01 м [17]. Два трекера системы симметрично крепились на пояс человека: один спереди, второй сзади [18]. Такое размещение обеспечивало устойчивое отслеживание положения: даже если один трекер временно теряет связь или перекрывается, второй продолжает передавать координаты.

Вторая система (S2) интегрирует компьютерное зрение и камеру с разрешением 1920 × 1080 пикселей и частотой записи 30 кадров/с [19]. Камера установлена на высоте 1,2 м на расстоянии 1,5 м от края беговой платформы. Для распознавания положения тела человека использовалась модель MediaPipe Pose версии 0.9, OpenCV версии 4.8.1.78 [12].

При выборе систем использовались следующие критерии применимости: ошибка позиционирования до 5 см, частота обновления не менее 30 Гц, суммарная латентность не более 100 мс. Конфигурация S1 удовлетворяла этим условиям. Конфигурация S2 соответствовала им при корректной установке камеры и контроле условий съемки, включая освещенность и отсутствие окклюзий [20].

Математическая модель контроллера предполагает деление полотна беговой дорожки на несколько функциональных зон, каждая из которых определяла логику поведения системы.

1. Граничная зона: по 0,3 м с переднего и заднего краев платформы (буферная зона безопасности). Система считает предаварийной ситуацией попадание пользователя в эту зону.

2. Зона экстренной остановки: 0,1 м, примыкает к граничной зоне. Если здесь оказывался человек, контроллер генерировал команду экстренного торможения.

3. Рабочая зона: центральная область платформы, в пределах которой применялась выбранная математическая функция регулирования скорости.

Распознавая человека, компьютерное зрение преобразовывало текущее положение тела по формуле:

$$U_0 = L_{TR} \frac{u_x - s_x}{e_x - s_x}, \quad (1)$$

где L_{TR} — длина платформы, м; u_x — текущее положение пользователя в кадре по оси X , полученное от MediaPipe Pose по двум точкам пояса; s_x , e_x — сохраненные начальное и конечное положение [21].

Для длинной беговой платформы можно преобразовать формулу (1) и получить метрическое положение человека относительно середины платформы, а не ее начала:

$$U_c = L_{TR} \frac{u_x - s_x}{e_x - s_x} \frac{L_{TR}}{2}. \quad (2)$$

Для системы компьютерного зрения использовалась формула (2), т.е. вариант 2. Трекеры виртуальной реальности можно откалибровать также в центре беговой дорожки, поэтому в единой системе относительных координат определялось метрическое положение (U) от обеих систем.

Реализовались три базовые функции управления [15], каждая из которых принимала на вход значение текущего положения пользователя U в момент времени t и возвращала целевое значение скорости движения полотна.

Линейная функция F_L определяла скорость платформы по положению человека U относительно границы безопасной зоны:

$$F_L(U) = \frac{U - L_{TRS}}{k_l - L_{TRS}} V_P,$$

где L_{TRS} — длина безопасной зоны, м; k_l — установленный размер рабочей зоны, м; V_P — максимальная скорость платформы, м/с.

Нелинейная функция F_N основана на более плавном изменении скорости. Ее вид зависит от значения коэффициента k_a :

$$F_N(U) = \left(\frac{U - L_{TRS}}{k_l - L_{TRS}} \right)^{k_a} V_P.$$

В предшествующем исследовании [15] было установлено, что приемлемые значения параметра k_a находятся в интервале $0,3 \leq k_a \leq 0,7$.

ПИД-функция F_{PID} основана на ПИД-законе регулирования и задействовала информацию о смещении пользователя относительно предыдущего замера, а также о его скорости (производной от этого смещения):

$$F_{PID}(U_{t+\Delta t}, t + \Delta t) = k_p (U_{t+\Delta t} - L_{TRS}) + k_i \int_0^{t+\Delta t} (U_{t+\Delta t} - U_t) + k_d \left(\frac{U_{t+\Delta t} - U_t}{\Delta t} \right).$$

Здесь $U_{t+\Delta t}$, U_t — текущее и предыдущее положение пользователя в моменты времени $t + \Delta t$ и t соответственно. $F_{PID}(U_{t+\Delta t}, t + \Delta t)$ — новое значение скорости для момента времени $t + \Delta t$ при положении $U_{t+\Delta t}$. Поправочные коэффициенты k_p , k_i , и k_d определяют влияние пропорциональной, интегральной и дифференциальной составляющей функции FPID.

Для оценки качества работы функций управления разработан набор метрик.

Метрики оценки стабильности позиции пользователя

1. R_{ZD} — максимальный диапазон изменения положения пользователя за время сессии (м, меньше — лучше).
2. R_{ZMD} — интервал стационарности положения. Вычисляется как 90-й перцентиль модуля отклонения от медианного положения пользователя (м, меньше — лучше).

Метрики переходного процесса (динамики разгона)

3. R_{ZTO} — время выхода на рабочий режим по положению (с, меньше — лучше). Определялось как момент, когда положение пользователя впервые остается в пределах интервала стационарности в течение не менее 2 с.
4. R_{ZAO} — максимальное отклонение положения пользователя при начальном разгоне (м, меньше — лучше). Характеризовало амплитуду переходного процесса по положению.

5. R_{STO} — время выхода на рабочий режим по скорости движения полотна (с, меньше — лучше).

6. R_{SAO} — максимальное отклонение скорости полотна относительно установившейся средней скорости (м/с, меньше — лучше). Характеризовало амплитуду переходного процесса по скорости.

Метрики микродинамики (качество слежения)

7. R_{ZFMEAN} — математическое ожидание амплитуды высокочастотных колебаний положения (м, меньше — лучше). Вычислялось как разность между верхней и нижней огибающими сигнала положения.

8. R_{ZFSMAE} — средняя абсолютная ошибка между двумя сглаженными траекториями (применялись цифровые фильтры нижних частот Баттерворта 5-го порядка с частотами среза 0,5 Гц и 0,1 Гц). Фильтр 0,5 Гц отсекает шумы трекера, а 0,1 Гц — естественные раскачивания туловища при ходьбе. Показатель использовался для оценки рассогласования между более быстрыми и более медленными изменениями положения пользователя.

Субъективная метрика

9. R_G — оценка качества и комфорта, выставляемая самим участником после каждого прогона по 10-балльной шкале (1 — сильный дискомфорт, угроза падения, 10 — движение абсолютно неотлично от естественной ходьбы по полу).

Метрики имели разную размерность и разное направление улучшения показателя, поэтому перед расчетом интегрального критерия выполнялась нормализация. Для каждой метрики R_i рассчитывалось нормированное значение:

$$R_i^{norm} = \frac{R_i - R_i^{base}}{R_i^{max} - R_i^{base}},$$

где R_i^{norm} — нормированное значение i -й метрики; R_i — исходное значение метрики, полученное в эксперименте; R_i^{max} — максимальное значение метрики во всех экспериментах рассматриваемого этапа; R_i^{base} — базовое значение метрики.

В качестве базового использовалось нулевое значение, так как для большинства метрик, входящих в интегральный критерий, целевым является стремление к нулю.

Для метрик, уменьшение которых соответствует улучшению качества управления, в интегральный критерий включалось само нормированное значение: $R_i = R_i^{norm}$. Для субъективной оценки качества движения большее значение соответствует лучшему результату, поэтому направление шкалы инвертировалось, использовалось преобразование: $R_G = 1 - R_G^{norm}$.

Все показатели привели к единому направлению оптимизации, и интегральный критерий качества управления рассчитывался как взвешенная сумма нормированных метрик. Весовые коэффициенты w_i распределили методом экспертных оценок с наивысшим приоритетом параметров физической безопасности и стабильности: R_{STO} (0,1684); R_{ZTO} (0,1579); R_{ZFMEAN} (0,1579); R_{SAO} (0,1263); R_{ZD} (0,1263); R_{ZAO} (0,1263); R_G (0,0737); R_{ZFSMAE} (0,0421); R_{ZMD} (0,0211). Таким образом, целевая функция оптимизации сводилась к минимизации значения R_Q , которое будет целевой функцией при выборе параметров линейной, нелинейной и ПИД-функции управления:

$$R_Q = \sum_{i=1}^N w_i R_i,$$

где w_i — весовой коэффициент i -й метрики; N — общее число метрик.

Для проверки устойчивости интегрального критерия к экспертному назначению весов провели анализ чувствительности. В каждой итерации весовые коэффициенты независимо изменяли случайным образом в пределах $\pm 20\%$ от исходных значений, после чего повторно нормировали так, чтобы их сумма оставалась равной единице. Для каждого набора весов пересчитывали интегральные оценки шести сочетаний функции управления и системы отслеживания и формировали новое ранжирование. Всего было выполнено 1000 итераций. Сходство каждого полученного ранжирования с исходным оценивали коэффициентом ранговой корреляции Кендалла.

Таким образом, процедура расчета проводилась в четыре этапа:

- расчет исходных метрик по временному ряду положения пользователя и скорости полотна;
- нормализация каждой метрики относительно максимального значения в экспериментальной выборке;
- инвертирование субъективной оценки как показателя, который должен увеличиваться;
- расчет взвешенной суммы нормированных метрик.

Полученное значение R_Q использовалось как целевая функция при выборе параметров линейной, нелинейной и ПИД-функции управления.

В эксперименте по подбору параметров функций управления приняли участие 5 здоровых мужчин. Выбор такого состава испытуемых объясняется необходимостью оценить работу алгоритмов на устойчивых и воспроизводимых траекториях ходьбы. Результаты характеризуют стендовую настройку системы, их применение для пациентов с нарушениями походки требует отдельной проверки.

При итоговом сравнении функций управления отдельную выборку расширили до 10 здоровых испытуемых, что позволило проверить выбранные параметры в едином сравнительном эксперименте.

Выполнили по три прохода для каждой параметрической конфигурации (5 вариантов для линейной, 12 для нелинейной, 16 для ПИД). Длительность одного прохода — 60 секунд. Первые 10–15 секунд занимает переходный процесс (набор скорости и синхронизация), оставшиеся 45–50 секунд используются для оценки движения в более устойчивом режиме. Выбранная длительность позволяет избежать заметного утомления участников и при этом получить достаточный временной ряд для расчетов.

Задача испытуемого — начать движение из состояния полного покоя, плавно набрать комфортную для себя скорость ходьбы и поддерживать ее в течение эксперимента. Через 60 секунд контроллер автоматически выполнял плавное торможение. Во время всех тестов рядом с платформой находился оператор с кнопкой аварийной остановки.

Проведено 165 уникальных экспериментов и получено 495 валидных записей временных рядов положения пользователя и скорости движения полотна.

Исследование проводилось в два этапа. На предварительном этапе с участием пяти здоровых мужчин выполнялась параметрическая настройка линейной, нелинейной и ПИД-функций управления. На основном этапе выбранные конфигурации проверяли на отдельной группе из десяти здоровых мужчин, не участвовавших в подборе параметров. Возраст участников — $22,5 \pm 3,2$ года, средний рост — $179 \pm 5,23$ см. Такое разделение выборки позволило отделить процедуру настройки функций от последующего сравнительного испытания выбранных конфигураций.

Результаты исследования. На первом этапе выполнен подбор параметра k_l рабочей зоны для линейной функции управления F_L . Результаты расчета метрик для различных значений параметра в диапазоне от 0,5 до 1,5 метров представлены в таблице 1.

Таблица 1

Результаты тестирования линейной функции управления

Метрика	Параметр k_l , м				
	0,50	0,75	1,00	1,25	1,50
R_G	0,00	0,70	0,90	0,90	1,00
R_{SAO}	1,00	0,28	0,08	0,04	0,00
R_{STO}	0,00	0,15	0,45	0,73	1,00
R_{ZFSMAE}	0,36	1,00	0,00	0,38	0,36
R_{ZFMEAN}	0,00	0,20	0,22	0,60	1,00
R_{ZMD}	0,47	0,22	0,00	0,90	1,00
R_{ZAO}	1,00	0,26	0,10	0,08	0,00
R_{ZTO}	0,00	0,09	0,50	0,74	1,00
Сумма метрик R_Σ	3,82	2,48	1,45	3,56	4,38
Сумма метрик (взвешенная, R_Q)	2,65	1,40	1,35	2,38	3,08

При малых значениях рабочей зоны фиксируются самые высокие показатели амплитуды всплеска скорости полотна и максимального отклонения положения пользователя при начальном разгоне. С увеличением рабочей зоны возрастает время выхода на рабочий режим по скорости и положению. Кроме того, при максимальном значении рабочей зоны наблюдается увеличение интервала стационарности положения пользователя и математического ожидания амплитуды высокочастотных колебаний положения.

Максимальную субъективную оценку R_G получили при $k_l = 1,5$ м, минимальное значение интегрального критерия качества для линейной функции в исследованном диапазоне получили при рабочей зоне 1 м.

Далее выполнен подбор параметров для нелинейной функции управления F_N . В этом случае одновременно варьировались два параметра: длина рабочей зоны и коэффициент нелинейности k_a . Результаты эксперимента представлены в таблице 2, где для каждой конфигурации приведены значения основных нормированных метрик и интегрального критерия качества управления.

Таблица 2

Результаты тестирования нелинейной функции управления

Параметры (k_l/k_a)	R_G (субъективная оценка)	R_{SAO} (ошибка скорости)	R_{STO} (время выхода на рабочую скорость)	R_{ZMD} (стационарность)	Интегральный критерий (взвешенная сумма)
0,50 м / 0,3	$0,28 \pm 0,31$	$0,50 \pm 0,25$	$0,36 \pm 0,26$	$0,11 \pm 0,09$	2,48
0,50 м / 0,4	$0,40 \pm 0,29$	$0,39 \pm 0,10$	$0,42 \pm 0,17$	$0,06 \pm 0,03$	2,18
0,50 м / 0,6	$0,52 \pm 0,28$	$0,42 \pm 0,19$	$0,30 \pm 0,14$	$0,07 \pm 0,09$	1,91
0,75 м / 0,3	$0,52 \pm 0,17$	$0,16 \pm 0,15$	$0,17 \pm 0,12$	$0,12 \pm 0,07$	1,24
0,75 м / 0,4	$0,68 \pm 0,25$	$0,10 \pm 0,13$	$0,25 \pm 0,21$	$0,11 \pm 0,08$	1,28
0,75 м / 0,6	$0,68 \pm 0,17$	$0,12 \pm 0,15$	$0,30 \pm 0,23$	$0,07 \pm 0,04$	1,40
1,00 м / 0,3	$0,72 \pm 0,28$	$0,03 \pm 0,07$	$0,39 \pm 0,21$	$0,21 \pm 0,14$	1,30
1,00 м / 0,4	$0,80 \pm 0,13$	$0,04 \pm 0,13$	$0,50 \pm 0,33$	$0,21 \pm 0,12$	1,53
1,00 м / 0,6	$0,88 \pm 0,17$	$0,01 \pm 0,03$	$0,49 \pm 0,25$	$0,16 \pm 0,10$	1,42
1,50 м / 0,3	$0,80 \pm 0,26$	$0,00 \pm 0,00$	$0,75 \pm 0,19$	$0,42 \pm 0,24$	1,84
1,50 м / 0,4	$0,88 \pm 0,17$	$0,00 \pm 0,00$	$0,69 \pm 0,15$	$0,45 \pm 0,19$	1,76
1,50 м / 0,6	$0,76 \pm 0,15$	$0,00 \pm 0,00$	$0,64 \pm 0,15$	$0,39 \pm 0,23$	1,85

Анализ полученных данных показал, что для нелинейной функции минимальное значение интегрального критерия (1,24) получено при рабочей зоне 0,75 м и коэффициенте нелинейности 0,3.

Дополнительно оценивалась индивидуальная устойчивость выбранных параметров нелинейной функции. Для каждого из пяти участников интегральный критерий рассчитывали отдельно по всем сочетаниям длины рабочей зоны и коэффициента нелинейности. У двух участников индивидуальный минимум совпал с групповым, у двух других лучшие значения располагались в непосредственной близости от группового минимума. У одного испытуемого распределение интегральных оценок существенно отличалось от группового результата. Следовательно, параметры, выбранные по усредненным данным, могут рассматриваться как начальные настройки управления.

На следующем этапе исследовалась ПИД-функция управления F_{PID} . При фиксированном пропорциональном коэффициенте $k_p = 2,0$ варьировались значения интегрального k_i и дифференциального k_d коэффициентов (таблица 3).

Таблица 3

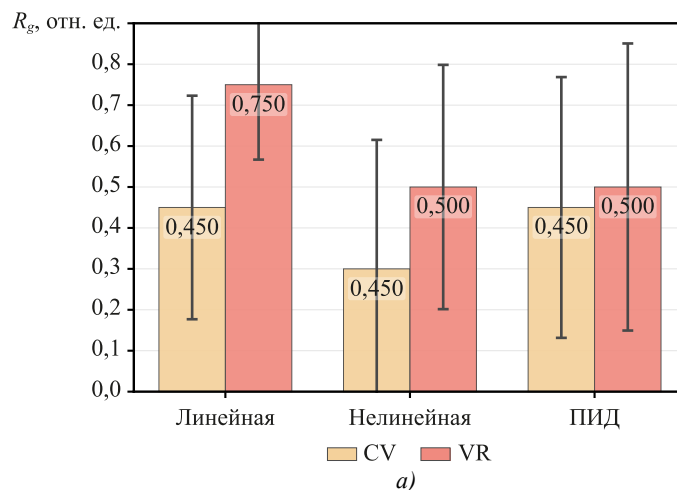
Результаты тестирования ПИД-функции управления при фиксированном пропорциональном коэффициенте 2,0

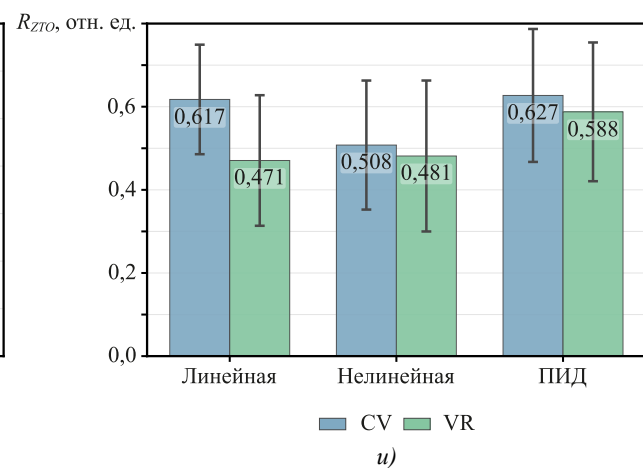
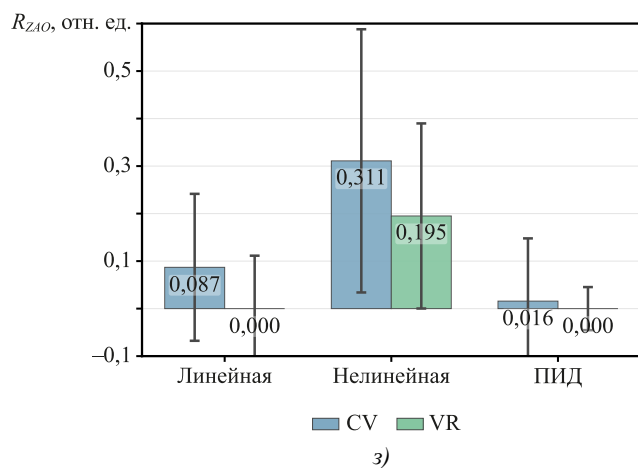
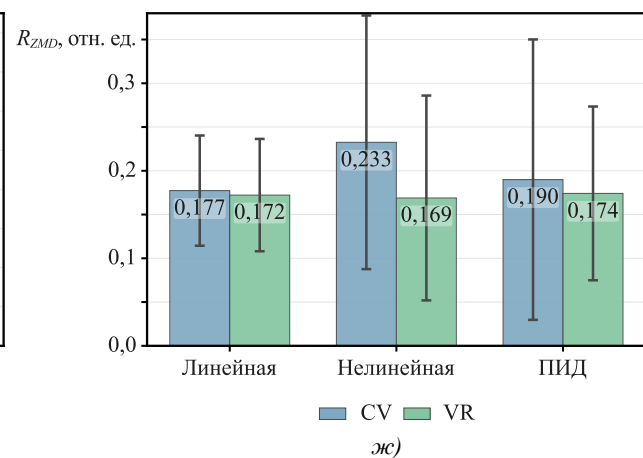
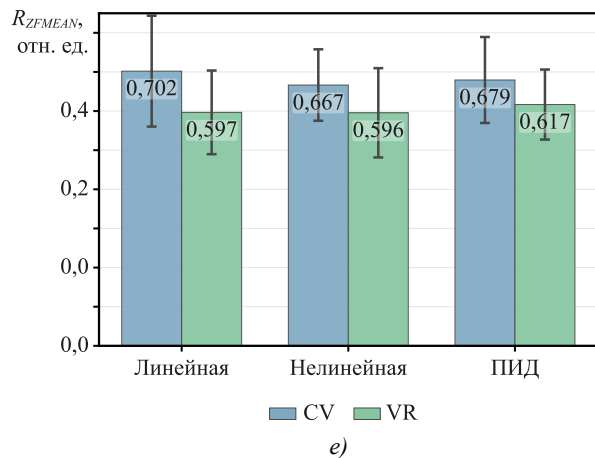
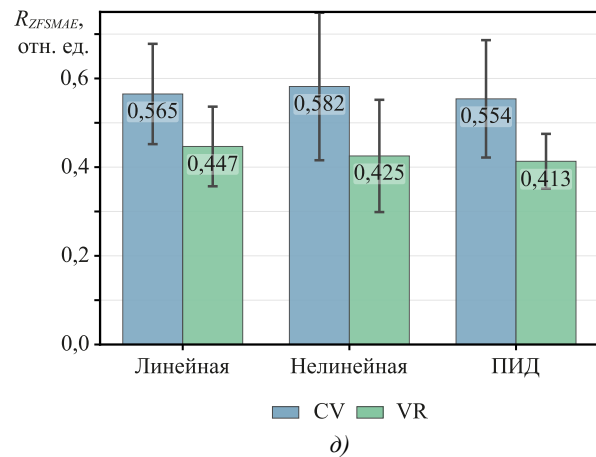
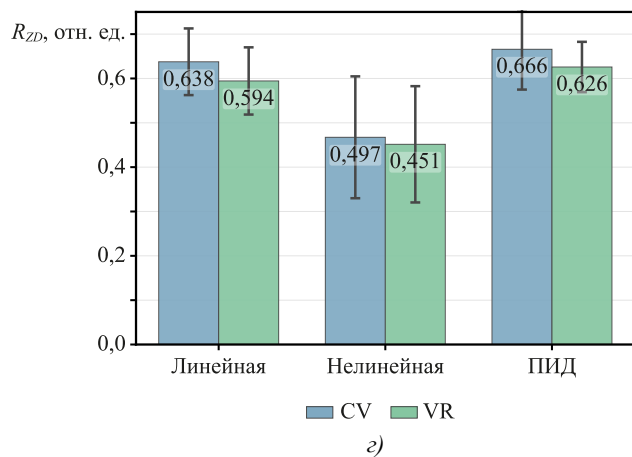
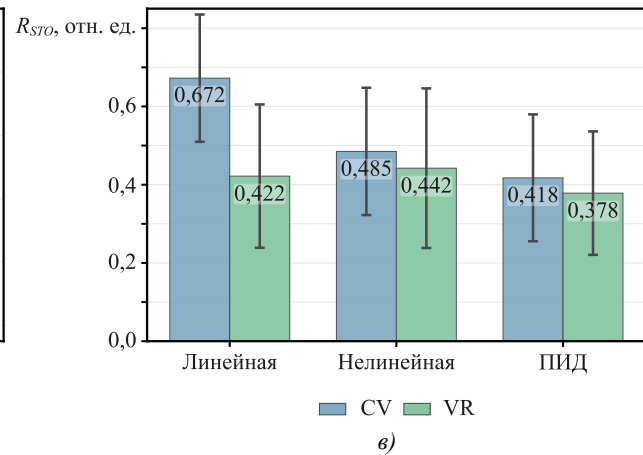
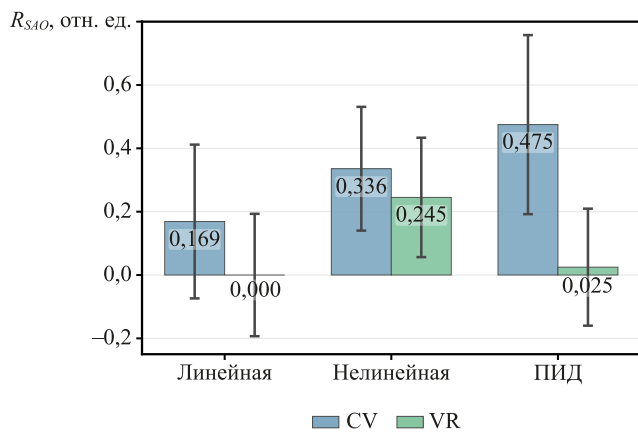
Параметры (k_i/k_d)	R_G	R_{SAO}	R_{STO}	R_{ZMD}	Интегральный критерий
0,1 / 0,1	0,75 ± 0,19	0,00 ± 0,00	0,68 ± 0,22	0,43 ± 0,22	1,66
0,1 / 0,5	0,69 ± 0,25	0,10 ± 0,11	0,39 ± 0,10	0,18 ± 0,09	1,49
0,1 / 1,0	0,56 ± 0,30	0,25 ± 0,15	0,30 ± 0,14	0,16 ± 0,08	1,46
0,1 / 2,0	0,50 ± 0,37	0,48 ± 0,32	0,11 ± 0,13	0,23 ± 0,18	1,47
0,5 / 0,1	0,75 ± 0,21	0,10 ± 0,15	0,39 ± 0,12	0,12 ± 0,07	1,38
0,5 / 0,5	0,72 ± 0,17	0,17 ± 0,14	0,32 ± 0,07	0,11 ± 0,10	1,15
0,5 / 1,0	0,69 ± 0,21	0,25 ± 0,13	0,21 ± 0,09	0,16 ± 0,17	1,21
0,5 / 2,0	0,53 ± 0,37	0,63 ± 0,20	0,08 ± 0,04	0,31 ± 0,26	1,67
1,0 / 0,1	0,78 ± 0,16	0,14 ± 0,16	0,45 ± 0,12	0,13 ± 0,12	1,45
1,0 / 0,5	0,72 ± 0,21	0,14 ± 0,13	0,35 ± 0,07	0,15 ± 0,11	1,35
1,0 / 1,0	0,69 ± 0,21	0,32 ± 0,15	0,18 ± 0,04	0,11 ± 0,11	1,27
1,0 / 2,0	0,61 ± 0,29	0,64 ± 0,20	0,09 ± 0,05	0,27 ± 0,24	1,50
2,0 / 0,1	0,78 ± 0,18	0,14 ± 0,16	0,48 ± 0,13	0,13 ± 0,11	1,52
2,0 / 0,5	0,78 ± 0,16	0,15 ± 0,12	0,33 ± 0,12	0,15 ± 0,12	1,39
2,0 / 1,0	0,61 ± 0,29	0,28 ± 0,21	0,19 ± 0,05	0,14 ± 0,09	1,30
2,0 / 2,0	0,53 ± 0,38	0,50 ± 0,19	0,08 ± 0,04	0,29 ± 0,25	1,48

Минимальное значение интегрального критерия качества для ПИД-функции (1,15) получено при значениях интегрального и дифференциального коэффициентов 0,5 и 0,5. При увеличении дифференциального коэффициента в исследованных конфигурациях почти всегда наблюдалось увеличение амплитуды всплеска скорости полотно. В каждой группе при наименьших значениях интегрального коэффициента сохранялось более высокое значение интервала стационарности положения пользователя.

В качестве дополнительного показателя конфигураций регистрировали случаи выхода пользователя за пределы области, в которой действовала функция управления. Из 495 записей предварительного этапа такие случаи выявили в 7,7 %. При этом большинство выходов за рабочую область было зарегистрировано при ее длине 0,5 м, что дополнительно обосновывает выбор более длинных рабочих зон.

После подбора параметров сравнили три функции управления при выбранных конфигурациях. Дополнительно оценивалось влияние системы отслеживания положения пользователя: компьютерного зрения (CV) и трекеров виртуальной реальности (VR). Результаты сравнения на расширенной выборке участников (10 здоровых мужчин) представлены на рис. 1 и в таблице 4. Отметим отличие цвета графиков на рис. 1 а и на рис. 1 б–л. Разница в оформлении подчеркивает, что в первом случае визуализируются метрики, значения которых необходимо максимизировать, а во всех остальных — метрики, значения которых нужно минимизировать.





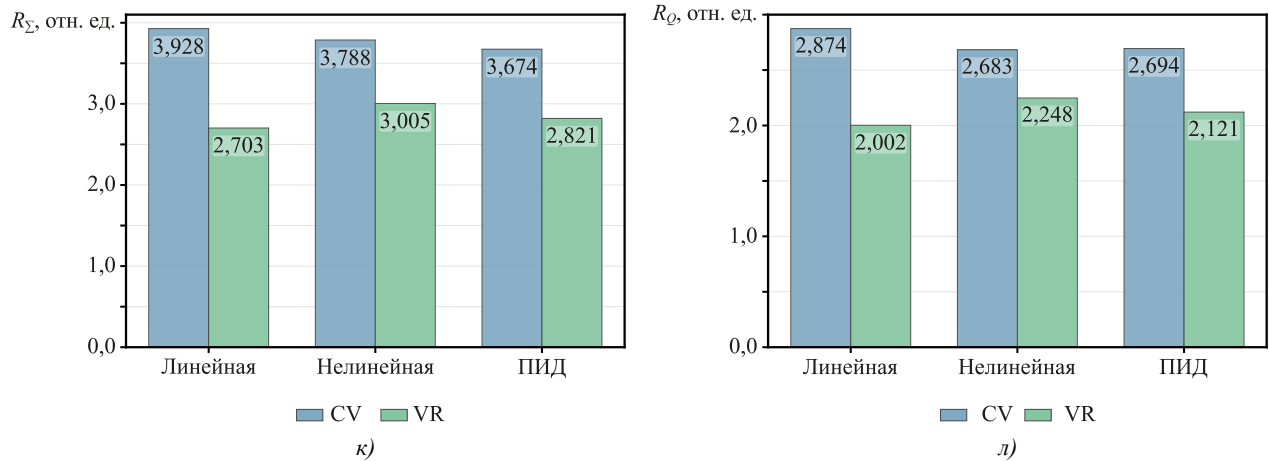


Рис. 1. Сравнение функций управления по метрикам качества: *а* — субъективная оценка; *б* — амплитуда всплеска скорости; *в* — время выхода на рабочий режим по скорости; *г* — диапазон изменения положения; *д* — средняя абсолютная ошибка сглаженных траекторий; *е* — среднее значение быстрых колебаний положения; *ж* — интервал стационарности положения; *з* — амплитуда переходного процесса по положению; *и* — время выхода на рабочий режим по положению; *к* — сумма метрик; *л* — взвешенная сумма метрик

Таблица 4

Итоговое сравнение функций управления при выбранных параметрах

Функция	Выбранные параметры	CV / VR					Рекомендация
		R_G	R_{SAO}	R_{STO}	R_{ZMD}	R_Q	
Линейная	$k_l = 1,0$ м	0,450/0,750	0,169/0,000	0,672/0,422	0,177/0,172	2,874/2,002	Базовый вариант для контура с VR-трекерами
Нелинейная	$k_l = 0,75$ м; $k_a = 0,3$	0,300/0,500	0,336/0,245	0,485/0,442	0,233/0,169	2,683/2,248	Предпочтительный вариант для системы компьютерного зрения
ПИД	$k_i = 0,5$; $k_d = 0,5$	0,450/0,500	0,475/0,025	0,418/0,378	0,190/0,174	2,694/2,121	Альтернативный вариант для CV при дополнительной настройке

По результатам итогового сравнения всех трех функций управления установлено, что значения интегрального критерия зависят как от выбранной функции управления, так и от системы отслеживания положения тела. При использовании системы компьютерного зрения взвешенная сумма метрик — 2,874 для линейной функции, 2,683 для нелинейной и 2,694 для ПИД. Соответствующие значения при использовании трекеров виртуальной реальности: 2,002, 2,248 и 2,121.

С применением системы компьютерного зрения минимальное значение интегрального критерия получено для нелинейной функции управления. С VR-трекерами наименьшее значение интегрального критерия для линейной функции управления обеспечило высокий результат субъективной оценки пользователей.

Для оценки зависимости результатов от выбранных весовых коэффициентов проанализировали чувствительность интегрального критерия. При случайном изменении каждого веса в пределах $\pm 20\%$ средний коэффициент Кендалла между исходным и пересчитанными ранжированиями составил $0,983 \pm 0,029$, что указывает на высокую устойчивость общей последовательности конфигураций.

Для всех трех конфигураций с VR-трекингом изменение весов ни в одной из 1000 итераций не приводило к изменению ранговых позиций. Для системы компьютерного зрения ранжирование было менее устойчивым: вероятность ухудшения позиции нелинейной функции — 2,7 %. Для ПИД-функции вероятность улучшения — 2,5 %, ухудшения — 22,7 %. Линейная функция улучшала позицию в 22,7 % итераций. Таким образом, вывод о предпочтительности линейной функции для VR-трекинга оказался устойчивым к умеренным изменениям приоритетов отдельных метрик. Для системы компьютерного зрения различия между функциями были менее однозначными, особенно между нелинейной и ПИД.

Статистическую значимость различий между функциями управления и системами отслеживания проверили с помощью непараметрического анализа на основе теста Манна — Уитни (таблица 5). Сравнение выполнялось попарно для всех комбинаций функций управления, отдельно для систем VR-трекеров и MediaPipe. Анализ проводился по всем основным метрикам.

Таблица 5

Результаты статистического анализа по критерию Манна — Уитни

Метрика	VR			CV		
	Лин. / нелин.	Лин. / ПИД	Нелин. / ПИД	Лин. / нелин.	Лин. / ПИД	Нелин. / ПИД
R_G	0,0132	0,0108	0,2046	0,1595	0,7427	0,5471
R_{SAO}	0,0006	0,7256	0,0004	0,1051	0,0027	0,0877
R_{STO}	0,6100	0,1715	0,0877	0,0575	0,0004	0,1023
R_{ZD}	0,0000	0,0232	0,0000	0,0000	0,0963	0,0000
R_{ZFMAE}	0,8303	0,2581	0,2581	0,5395	0,4119	0,1907
R_{ZFMEAN}	0,7506	0,3403	0,3632	0,2905	0,7283	0,5395
R_{ZMD}	0,7958	0,4553	0,6843	0,0003	0,1373	0,0351
R_{ZAO}	0,0000	0,0195	0,0000	0,0005	0,0567	0,0000
R_{ZTO}	0,8303	0,0905	0,1537	0,0327	0,3871	0,0103

Дополнительно сравнивались совокупные нормированные профили, сформированные из девяти метрик, входящих в интегральный критерий, и их невзвешенная сумма. Так стало известно, что при использовании VR-трекеров статистически значимые различия наблюдаются между линейной и нелинейной функциями ($p < 0,001$), а также между линейной и ПИД-функциями ($p = 0,0020$). Различие между нелинейной и ПИД-функциями не достигло принятого уровня статистической значимости ($p = 0,0574$). Для системы компьютерного зрения не выявлены статистически значимые различия совокупных профилей ($p = 0,1407$ – $0,5664$), что указывает на менее выраженные различия между функциями управления. Значения были получены путем попарного сравнения объединенных нормированных показателей для каждой функции управления и системы отслеживания. Непосредственно интегральный критерий в данном анализе не использовался.

Обсуждение. По результатам описательного сравнения и анализа чувствительности линейная функция с рабочей зоной 1,0 м может рассматриваться как базовая конфигурация для контура с VR-трекерами. Для компьютерного зрения наименьшее наблюдаемое значение интегрального критерия получено при использовании нелинейной функции с рабочей зоной 0,75 м и коэффициентом нелинейности 0,3. Однако близкое значение ПИД-функции и частичное изменение рангов при варьировании весов не позволяют говорить о доказанном превосходстве одного из этих двух вариантов.

Выбор функции управления не может рассматриваться отдельно от системы отслеживания. При использовании VR-трекеров положение человека определяется в метрической системе с большей стабильностью и частотой обновления, что позволяет использовать более простую функцию управления. В этих условиях линейный закон показал наименьшее значение интегрального критерия и наибольшую субъективную оценку.

Для системы компьютерного зрения различия между нелинейной и ПИД-функцией оказались менее выраженными. В эксперименте минимальное значение интегрального критерия получено для нелинейной функции, однако ПИД-функция показала близкий результат. Это позволяет рассматривать оба варианта как возможные для контура с компьютерным зрением, но с учетом качества распознавания положения, частоты обновления данных и необходимости дополнительной фильтрации координат.

Более сложная структура регулятора не всегда улучшает итоговое качество управления. ПИД-функция показала наименьшее значение интегрального критерия на этапе параметрической настройки на малой выборке, однако в общем сравнении с VR-трекингом лучшие результаты получены для линейного закона.

Системная латентность измерительного контура составила $31,3 \pm 0,72$ мс для VR-трекеров и около 34,86 мс для системы компьютерного зрения. Оба значения ниже принятого порога 100 мс, использованного как критерий приемлемости для управления в реальном времени. При этом система компьютерного зрения требует более строгого контроля условий съемки, так как качество распознавания зависит от освещенности, положения камеры и возможных окклюзий.

Полученные результаты согласуются с общей логикой исследований адаптивных беговых платформ, где качество управления определяется не только законом регулирования, но и стабильностью измерения положения пользователя. При этом представленная работа уточняет данные предшествующих научных изысканий — демонстрирует прямое сравнение функций управления в двух измерительных контурах: VR-трекинга и компьютерного зрения.

Отметим ограничения исследования: малый объем выборки и участие только здоровых добровольцев. В этой связи итоги работы следует рассматривать как этап предварительной инженерной валидации, настройки адаптивных беговых платформ и подбора начальных параметров функций управления. Для пациентов с нарушениями походки, равновесия или выраженной асимметрией шага возможны иные значения оптимальных коэффициентов и иная реакция на изменение скорости полотна. Соответственно, в перспективе на более широкой выборке планируется проверить статистическую значимость различий между отдельными функциями управления, рассчитать доверительные интервалы, проанализировать влияние индивидуальных особенностей пользователя и проверить клиническую применимость предложенных настроек.

Заключение. В работе решена задача параметрической оптимизации линейной, нелинейной и ПИД-функций управления адаптивной беговой платформой для систем опорно-двигательной реабилитации. Предложен и применен интегральный критерий качества управления, объединяющий метрически и физиологически интерпретируемые показатели: среднее смещение пользователя, длительность и амплитуду переходных процессов, микродинамику слежения и субъективную оценку качества движения. Апробирована процедура выбора параметров функций управления на основе интегрального критерия качества.

Перечислим три основных результата работы.

1. Определены наилучшие в исследованном диапазоне параметры функций управления:

- для линейной — длина рабочей зоны 1,0 м;
- для нелинейной — длина рабочей зоны 0,75 м и коэффициент нелинейности 0,3;
- для ПИД — интегральный и дифференциальный коэффициенты 0,5 при пропорциональном коэффициенте 2,0.

2. Установлено, что предпочтительная функция управления зависит от характеристик измерительного тракта. При использовании VR-трекеров наименьшее значение интегрального критерия получено для линейной функции — 2,002. При использовании компьютерного зрения наименьшее значение критерия получено для нелинейной функции — 2,683, при близком результате ПИД-функции — 2,694.

3. Сформулированы инженерные рекомендации по выбору конфигурации системы управления. Линейная функция с рабочей зоной 1,0 м предлагается в качестве базового варианта для контура с VR-трекерами. При работе с системой компьютерного зрения следует предпочесть нелинейную функцию с рабочей зоной 0,75 м и коэффициентом нелинейности 0,3, а ПИД-функция может рассматриваться как сопоставимый альтернативный вариант.

Полученные результаты имеют практическую значимость для разработки адаптивных беговых платформ и настройки алгоритмов управления в составе реабилитационных систем. Перспективы дальнейших исследований связаны с проверкой предложенных параметров в экспериментах с большим количеством участников, включая пациентов с нарушениями походки. Кроме того, планируется разработка процедуры индивидуальной настройки функций управления по данным первых минут движения на платформе.

Список литературы / References

1. Pacheco MP, Carvalho PJ, Cavaleiro L, Sousa FM. Prevalence of Postural Changes and Musculoskeletal Disorders in Young Adults. *International Journal of Environmental Research and Public Health*. 2023;20(24):7191. <https://doi.org/10.3390/ijerph20247191>
2. Cieza A, Causey K, Kamenov K, Hanson SW, Chatterji S, Vos T. Global Estimates of the Need for Rehabilitation Based on the Global Burden of Disease Study 2019: A Systematic Analysis for the Global Burden of Disease Study 2019. *The Lancet*. 2020;396(10267):2006–2017. [https://doi.org/10.1016/S0140-6736\(20\)32340-0](https://doi.org/10.1016/S0140-6736(20)32340-0)
3. Mikolajczyk T, Ciobanu I, Badea DI, Iliescu A, Pizzamiglio S, Schaeuett T, et al. Advanced Technology for Gait Rehabilitation: An Overview. *Advances in Mechanical Engineering*. 2018;10(7):1–19. <https://doi.org/10.1177/1687814018783627>
4. Campagnini S, Liuzzi P, Mannini A, Riener R, Carrozza MC. Effects of Control Strategies on Gait in Robot-Assisted Post-Stroke Lower Limb Rehabilitation: A Systematic Review. *Journal of NeuroEngineering and Rehabilitation*. 2022;19(1):52. <https://doi.org/10.1186/s12984-022-01031-5>
5. Solanki D, Kumar S, Raj P, Lahiri U. Body Weight Support Assisted Virtual Reality Based Treadmill Walk with Gait Characterization. In: *Proc. 10th International Conference on Computing, Communication and Networking Technologies (ICCCNT)*. New York City: IEEE; 2019. P. 1–7. <https://doi.org/10.1109/ICCCNT45670.2019.8944611>
6. Dib D, Merkuryev IV. Optimal Control Method for a Lower-Limb Exoskeleton with Elastic Elements. *Advanced Engineering Research (Rostov-on-Don)*. 2025;25(3):186–196. <https://doi.org/10.23947/2687-1653-2025-25-3-186-196>
7. Sanghun Pyo, Hosu Lee, Jungwon Yoon. Development of a Novel Omnidirectional Treadmill-Based Locomotion Interface Device with Running Capability. *Applied Sciences*. 2021;11(9):4223. <https://doi.org/10.3390/app11094223>
8. Donlin MC, Ray NT, Higginson JS. User-Driven Treadmill Walking Promotes Healthy Step Width after Stroke. *Gait & Posture*. 2021;86:256–259. <https://doi.org/10.1016/j.gaitpost.2021.03.031>

9. Jungwon Yoon, Hyung-Soon Park, Damiano DL. A Novel Walking Speed Estimation Scheme and Its Application to Treadmill Control for Gait Rehabilitation. *Journal of NeuroEngineering and Rehabilitation*. 2012;9:62. <https://doi.org/10.1186/1743-0003-9-62>
10. Seungmoon Song, Hojung Choi, Collins SH. Using Force Data to Self-Pace an Instrumented Treadmill and Measure Self-Selected Walking Speed. *Journal of NeuroEngineering and Rehabilitation*. 2020;17:68. <https://doi.org/10.1186/s12984-020-00683-5>
11. Wei Wang, Kaiming Yang, Yu Zhu, Haihua Mu. Speed Adaptation and Acceleration Ripple Suppression of Treadmill User System Using a Virtual Force Moment Balance Model. *Transactions of the Institute of Measurement and Control*. 2020;42(2):322–329. <https://doi.org/10.1177/0142331219868924>
12. Obukhov A, Volkov A, Pchelintsev A, Nazarova A, Teselkin D, Surkova E, et al. Examination of the Accuracy of Movement Tracking Systems for Monitoring Exercise for Musculoskeletal Rehabilitation. *Sensors*. 2023;23(19):8058. <https://doi.org/10.3390/s23198058>
13. Sokolov SV, Marshakov DV, Reshetnikova IV. Optical Flow Parameter Identification in Vision Systems under Measurement Noise with Unknown Probabilistic Characteristics. *Advanced Engineering Research (Rostov-on-Don)*. 2026;26(1):2220. <https://doi.org/10.23947/2687-1653-2026-26-1-2220>
14. Сиухин А.А., Карпушкин С.В. Структурно-параметрический синтез системы контроля качества функционирования тренажера на основе адаптивного управления средствами имитации. *Вестник Тамбовского государственного технического университета*. 2022;28(3):387–397. <https://doi.org/10.17277/vestnik.2022.03.pp.387-397>
- Siukhin AA, Karpushkin SV. Structural-Parametric Synthesis of the Quality Control System for the Simulator Based on Adaptive Control of Simulation Tools. *Transactions of Tambov State Technical University*. 2022;28(3):387–397. <https://doi.org/10.17277/vestnik.2022.03.pp.387-397>
15. Obukhov AD, Krasnyanskiy MN, Dedov DL, Vostrikova VV, Teselkin DV, Surkova EO. Control of Adaptive Running Platform Based on Machine Vision Technologies and Neural Networks. *Neural Computing & Applications*. 2022;34(15):12919–12946. <https://doi.org/10.1007/s00521-022-07166-9>
16. Žuk M, Wojtków M, Popek M, Mazur J, Bulińska K. Three-Dimensional Gait Analysis Using a Virtual Reality Tracking System. *Measurement*. 2022;188:110627. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2021.110627>
17. Merker S, Pastel S, Bürger D, Schwadtke A, Witte K. Measurement Accuracy of the HTC VIVE Tracker 3.0 Compared to Vicon System for Generating Valid Positional Feedback in Virtual Reality. *Sensors*. 2023;23(17):7371. <https://doi.org/10.3390/s23177371>
18. Van Hooren B, Pecasse N, Meijer K, Essers JMN. The Accuracy of Markerless Motion Capture Combined with Computer Vision Techniques for Measuring Running Kinematics. *Scandinavian Journal of Medicine & Science in Sports*. 2023;33(6):966–978. <https://doi.org/10.1111/sms.14319>
19. Díaz-Arancibia J, Córdova M, Arango-López J, Ahumada D, Moreira F. Automatic Gait Analysis through Computer Vision: A Pilot Study. *Neural Computing & Applications*. 2025;37:7619–7639. <https://doi.org/10.1007/s00521-023-08549-2>
20. Yi-Fang Tu, Ling-Yi Lin, Meng-Hsiun Tsai, Yi-Shan Sung, Yi-Shan Liu, Mu-Yen Chen. Motor Delay Image Recognition Based on Deep Learning and Human Skeleton Model. *Applied Soft Computing*. 2024;167(B):112364. <https://doi.org/10.1016/j.asoc.2024.112364>
21. D'Antonio E, Taborri J, Mileti I, Rossi S, Patanè F. Validation of a 3D Markerless System for Gait Analysis Based on OpenPose and Two RGB Webcams. *IEEE Sensors Journal*. 2021;21(15):17064–17075. <https://doi.org/10.1109/JSEN.2021.3081824>

Об авторах:

Андрей Андреевич Волков, ассистент кафедры «Системы автоматизированной поддержки принятия решений» Тамбовского государственного технического университета (392036, Российская Федерация, г. Тамбов, ул. Ленинградская, 1), [SPIN-код](#), [ORCID](#), [ScopusID](#), [ResearcherID](#), [ResearchGate](#), didim@eclabs.ru

Максим Андреевич Дудин, студент кафедры «Системы автоматизированной поддержки принятия решений» Тамбовского государственного технического университета (392036, Российская Федерация, г. Тамбов, ул. Ленинградская, 1), [ORCID](#), [ResearcherID](#), [ResearchGate](#), maxim_1dudin@mail.ru

Денис Леонидович Дедов, кандидат технических наук, доцент, старший научный сотрудник управления фундаментальных и прикладных исследований Тамбовского государственного технического университета (392036, Российская Федерация, г. Тамбов, ул. Ленинградская, 1), [SPIN-код](#), [ORCID](#), [ScopusID](#), [ResearcherID](#), [ResearchGate](#), hammer68@mail.ru

Артём Дмитриевич Обухов, доктор технических наук, профессор кафедры «Системы автоматизированной поддержки принятия решений» Тамбовского государственного технического университета (392036, Российская Федерация, г. Тамбов, ул. Ленинградская, 1), [SPIN-код](#), [ORCID](#), [ScopusID](#), [ResearcherID](#), [ResearchGate](#), obuhov.art@gmail.com

Заявленный вклад авторов:

А.А. Волков: проведение исследования, формальный анализ, написание черновика рукописи.

М.А. Дудин: разработка программного обеспечения, проведение исследования, формальный анализ.

Д.Л. Дедов: научное руководство, административное руководство исследовательским проектом, курирование данных, написание рукописи и редактирование.

А.Д. Обухов: научное руководство, разработка концепции и методологии исследования, формальный анализ, валидация результатов.

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Декларация ИИ: авторы заявляют, что при подготовке текста рукописи не использовались технологии генеративного искусственного интеллекта (ИИ), ИИ не является соавтором публикации: авторство присвоено только физическим лицам, внёсшим существенный интеллектуальный вклад в исследование.

About the Authors:

Andrey A. Volkov, Assistant of the Department of Automated Decision Support Systems, Tambov State Technical University (1, Leningradskaya Str., Tambov, 392036, Russian Federation), [SPIN-code](#), [ORCID](#), [ScopusID](#), [ResearcherID](#), [ResearchGate](#), didim@eclabs.ru

Maxim A. Dudin, Student of the Department of Automated Decision Support Systems, Tambov State Technical University (1, Leningradskaya Str., Tambov, 392036, Russian Federation), [ORCID](#), [ResearcherID](#), [ResearchGate](#), maxim_1dudin@mail.ru

Denis L. Dedov, Cand.Sci. (Eng.), Associate Professor, Senior Researcher of the Department of Fundamental and Applied Research, Tambov State Technical University (1, Leningradskaya Str., Tambov, 392036, Russian Federation), [SPIN-code](#), [ORCID](#), [ScopusID](#), [ResearcherID](#), [ResearchGate](#), hammer68@mail.ru

Artem D. Obukhov, Dr.Sci. (Eng.), Professor of the Department of Automated Decision Support Systems, Tambov State Technical University (1, Leningradskaya Str., Tambov, 392036, Russian Federation), [SPIN-code](#), [ORCID](#), [ScopusID](#), [ResearcherID](#), [ResearchGate](#), obuhov.art@gmail.com

Claimed Contributorship:

AA Volkov: investigation, formal analysis, writing – original draft preparation.

MA Dudin: software, investigation, formal analysis.

DL Dedov: supervision, project administration, data curation, writing & editing.

AD Obukhov: supervision, conceptualization, methodology, formal analysis, validation.

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

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

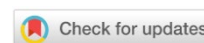
AI Declaration: the authors declare that generative artificial intelligence (AI) technologies were not used in the preparation of the manuscript and that AI is not a co-author of the publication: authorship is assigned only to natural persons who have made a substantial intellectual contribution to the research.

Поступила в редакцию / Received 28.04.2026

Поступила после рецензирования / Reviewed 25.05.2026

Принята к публикации / Accepted 08.06.2026

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



УДК 519.876.5

Оригинальное теоретическое исследование

<https://doi.org/10.23947/2687-1653-2026-26-3-2748>

Метод граничных и конечных элементов в динамических пространственных задачах для слоистых тел с частично-заглубленными объектами

С.Г. Глушко , А.А. Ляпин  

Донской государственный технический университет, г. Ростов-на-Дону,
Российская Федерация, <https://ror.org/00x5je630>

✉ lyapin.rnd@yandex.ru

EDN: ECLSYK

Аннотация

Введение. Проблемы динамического расчета поведения заданий и сооружений при наличии фундаментов сложного строения на многослойных грунтах, анализ многослойных покрытий с локальными включениями и неоднородностями вызывают широкий интерес научного сообщества и требуют дальнейшего развития методов динамического анализа и построения эффективных алгоритмов расчета волновых полей в указанных средах. Целью работы является анализ характеристик НДС сложной конструкции на многослойном основании с использованием связи МКЭ-МГЭ и сравнительный анализ эффективности применения различных технологий параллельных вычислений для оптимизации вычисления данных характеристик.

Материалы и методы. Рассмотрена техника перехода от описания стационарных колебаний изотропной линейно-упругой среды в виде уравнения Ламе к фундаментальным решениям метода граничных элементов (МГЭ) путем интегральных преобразований Фурье. Вид матриц фундаментальных решений опирается на суперпозицию решений трех вспомогательных задач. Рассматриваемая задача сводится к совместному решению дискретизированной СЛАУ МГЭ и уравнения движения МКЭ. Рассмотрена задача численного анализа конструкции с полузаглубленным фундаментом на многослойном основании с использованием разработанного программного решения и комплекса Ansys Mechanical.

Результаты исследования. Получены амплитудно-частотные характеристики заданной точки многослойного трехмерного основания, подверженного поверхностному динамическому воздействию. Рассмотрено несколько случаев постановки задачи – при наличии и отсутствии строительной конструкции, а также при различных конфигурациях жесткости сред основания. Дополнительно получены данные о перемещении точек основания на границах раздела слоев на отрезке под конструкцией. Выполнено измерение времени вычисления вектора напряжений для фундаментальных решений МГЭ. Рассмотрено влияние методик распараллеливания вычислений Coarray, MPI и OpenMP на языке Fortran на реальное и процессорное время работы программного модуля.

Обсуждение. Полученные результаты подтверждают теоретические представления о взаимном влиянии строительного объекта с фундаментом и окружающего его грунтового массива. В связи с тем, что решение рассмотренной задачи является ресурсоемким процессом и требует значительных временных затрат, применение технологий параллельных вычислений для оптимизации расчетов является естественным этапом развития программного продукта. Анализ затрат реального и процессорного времени работы программы с распараллеливанием до 8 потоков позволил оценить потенциал дальнейшего масштабирования данной задачи.

Заключение. На основании полученных результатов сделан вывод, что использованная технология матричного построения фундаментальных решений для многослойных сред с поверхностными и заглубленными объектами является эффективным инструментом, позволяющим точно учесть дисперсионные свойства многослойной

среды, условия излучения энергии на бесконечность при взаимодействии объекта и основания, а также естественным образом распараллелить вычислительные процессы при совместном применении МГЭ и МКЭ. Применение технологий Coarray, MPI и OpenMP для параллельных вычислений позволяет кратно снизить время работы программного модуля, не приводя к значительному увеличению затрат ресурсов.

Ключевые слова: метод граничных элементов, метод конечных элементов, многослойное полупространство, напряженно-деформированное состояние, фундаментальные решения, параллельные вычисления

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

Для цитирования. Глушко С.Г., Ляпин А.А. Метод граничных и конечных элементов в динамических пространственных задачах для слоистых тел с частично-заглубленными объектами. *Advanced Engineering Research (Rostov-on-Don)*. 2026;26(3):2748. <https://doi.org/10.23947/2687-1653-2026-26-3-2748>

Original Theoretical Research

Boundary and Finite Element Method in Dynamic Spatial Problems for Layered Bodies with Partially Embedded Objects

Sergey G. Glushko , Alexander A. Lyapin  

Don State Technical University, Rostov-on-Don, Russian Federation, <https://ror.org/00x5je630>

 lyapin.rnd@yandex.ru

Abstract

Introduction. The dynamic analysis of the behavior of buildings and structures featuring complex foundations on multilayered soils, as well as the analysis of multilayered coverings containing local inclusions and inhomogeneities, are subjects of great interest to the scientific community. These topics necessitate the further development of dynamic analysis methods and the creation of efficient algorithms for calculating wave fields in such media. This study aims to analyze the stress-strain state of a complex structure resting on a multilayer soil foundation using FEM-BEM coupling, and to comparatively assess the efficiency of various parallel computing technologies to optimize the calculation of these characteristics.

Materials and Methods. The technique of transition from the description of steady-state oscillations of an isotropic linear elastic medium in the form of the Lamé equation to the fundamental solutions of the boundary element method (BEM) by means of integral Fourier transforms is considered. The form of the fundamental solution matrices is based on the superposition of solutions to three auxiliary problems. The problem under consideration is reduced to the combined solution of a discretized BEM SLAE and the FEM equation of motion. The numerical analysis of a structure with a partially embedded foundation on a multilayer soil base is examined using a developed software solution and the Ansys Mechanical software suite.

Results. Amplitude-frequency characteristics were obtained for a specific point within a multilayer 3D foundation subjected to dynamic surface loading. Several problem formulations were considered — accounting for the presence or absence of a structure, as well as varying stiffness configurations of the foundation layers. Additionally, data were obtained regarding the displacement of points at the layer interfaces within the section beneath the structure. The computation time of the stress vector for the BEM fundamental solutions was measured. The impact of Coarray, MPI, and OpenMP parallelization techniques, implemented in Fortran, on the software module wall-clock and CPU execution time was analyzed.

Discussion. The results obtained confirm theoretical concepts regarding the interaction between the structure, including its foundation, and the surrounding soil mass. Given that solving the problem in question is a resource-intensive and time-consuming process, the use of parallel computing technologies to optimize calculations represents a natural step in the software evolution. An analysis of real-time and processor-time costs for the program, utilizing up to eight parallel threads, made it possible to assess the potential for further scaling this task.

Conclusion. The results lead to the conclusion that the matrix-based technique for constructing fundamental solutions for multilayer media with surface and embedded objects is an effective tool. It allows the dispersion properties of the multilayer medium and the radiation conditions at infinity arising from object-foundation interaction to be accurately captured, while also naturally enabling parallelization of the computational processes when the BEM and FEM are coupled. The use of Coarray, MPI, and OpenMP technologies for parallel computing significantly reduces the software module execution time without incurring a substantial increase in resource consumption.

Keywords: boundary element method, finite element method, multilayer half-space, stress-strain state, fundamental solutions, parallel computing

Acknowledgments. 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. Glushko SG, Lyapin AA. Boundary and Finite Element Method in Dynamic Spatial Problems for Layered Bodies with Partially Embedded Objects. *Advanced Engineering Research (Rostov-on-Don)*. 2026;26(3):2748. <https://doi.org/10.23947/2687-1653-2026-26-3-2748>

Введение. Проблемы динамического расчета поведения заданий и сооружений при наличии фундаментов сложного строения на многослойных основаниях, анализ многослойных покрытий с локальными включениями и неоднородностями [1] требуют дальнейшего развития методов динамического анализа и построения эффективных алгоритмов расчета волновых полей в указанных средах [2]. Широко используемые методы конечных элементов сталкиваются с рядом сложностей для полуограниченных слоистых сред, связанных с наличием отражающих границ и удовлетворением условий излучения волн на бесконечность. Представляет интерес увеличение эффективности численных методов расчета при наличии большого количества слоев применением различных схем распараллеливания. В данной работе развивается подход, связанный с совместным использованием методов конечных (МКЭ) и граничных элементов (МГЭ) для многослойных сред, контактирующих с объектами сложного строения.

В научной литературе широко исследованы гибридные методы, сочетающие МКЭ и МГЭ для решения задач акустики, взаимодействия жидкости и конструкций, а также рассеяния волн. В работе [3] представлен итерационный подход для анализа взаимодействия насыщенных пористых и герметичных упругих сред комбинацией МКЭ-МГЭ. Метод позволяет учитывать нелинейности в подобластях МКЭ. В работе [4] разработана явная процедура прямой связи МКЭ-МГЭ для нелинейной динамики. Метод позволяет анализировать подобласти независимо и использовать разные временные шаги, что повышает гибкость и эффективность связанных анализов. В работе [5] представлен метод связи МКЭ-МГЭ для анализа взаимодействия жидкости и конструкции во временной области. Метод использует оператор Пуанкаре-Стеклова и позволяет получать априорные оценки погрешности для модельных задач. В работе [6] проанализирована перекрывающаяся непрерывная модель для задачи распространения волн Гельмгольца в неограниченных областях. Метод позволяет точно сохранять условие излучения и демонстрирует эффективность для гетерогенных сред. В работе [7] разработана стратегия взаимодействия МКЭ-МГЭ для акустического рассеяния на гармониках времени в средах с переменной скоростью звука. Метод использует растворную переменную на границе связи и демонстрирует квази-оптимальную сходимость. В работе [8] предложен гибридный численный метод для решения задач изменения фазы с движущимися границами. Метод сочетает радиальные базисные функции и сеточный подход, что позволяет решать задачи растворения и затвердевания. В работе [9] исследованы апостериорные оценки ошибок для метода виртуальных элементов (МВЭ) и МКЭ на основе МГЭ. Метод позволяет вычислять расстояние между градиентом конечных элементов и его постобработанной версией, а также обнаруживать точки необычайной точности. В работе [10] предложен регуляризатор на основе условий излучения на поверхности (OSRC) для стабилизации связи МКЭ-МГЭ. Метод улучшает сходимость итеративных решателей, особенно на высоких частотах, и снижает вычислительные затраты. В работе [11] разработана структура глубокого обучения для прогнозирования передаточных функций в структурно-акустических моделях. Метод позволяет значительно сократить время вычислений по сравнению с традиционными МКЭ-вычислениями. В работе [12] предложена структура акустического анализа и оптимизации формы для трехмерных двукратно периодических многослойных структур. Метод использует изометрический метод граничных элементов (ИГ-МКЭ) и позволяет оптимизировать форму акустических структур. В работе [13] представлен полуаналитический метод конечных элементов для моделирования 2D направленных волн в композитных ламинатах. Метод позволяет анализировать рассеяние волн на расслоениях и получать коэффициенты отражения и пропускания. В работе [14] проведено сравнение высокопорядковых и плосковолновых базисных функций для решения задач Гельмгольца. Показано, что базис NURBS превосходит базис Лагранжа, а также проанализированы ошибки и численная дисперсия для различных базисов. В работе [15] предложен гибридный метод МКЭ-МГЭ для решения акустико-структурных задач. Метод использует дискретный сдвиговый зазор для построения МКЭ без блокировок и коллокацию МГЭ на основе формулировки Бертона-Миллера. В работе [16] разработана симметричная схема связи МКЭ-МГЭ для рассеяния переходных акустических волн на неоднородных анизотропных препятствиях. Метод позволяет дискретизировать прошедшую и рассеянную волны и демонстрирует устойчивость в гильбертовом пространстве.

Значительное число научных работ посвящено разработке численных методов для анализа слоистых, анизотропных и функционально-градиентных сред. В работе [17] предложен модифицированный метод конечных элементов с масштабируемой границей (МКЭМГ) для анализа динамического сопротивления анизотропных слоистых сред. Метод позволяет решать задачи для кросс-анизотропных и общих анизотропных сред, а также упрощает расчеты для кросс-анизотропных слоистых сред. В работе [18] МКЭМГ применен для решения динамической реакции трехмерного бесконечного грунта. Алгоритм непрерывного деления позволяет получать матрицу динамической жесткости слоистого грунта в частотной области, а также решать задачи для заглубленных фундаментов. В работе [19] разработан 3D подход, сочетающий МКЭ и МГЭ в частотной области для анализа динамического отклика конструкций на слоистых трансверсально-изотропных полупространствах. Метод использует функции Грина и позволяет

учитывать сингулярное поведение напряжений на границах раздела. В работе [20] предложена новая методология для анализа продольно-инвариантных задач взаимодействия грунт-конструкция в эластодинамике. Метод использует 2.5D связь МКЭ-МГЭ и позволяет повысить вычислительную эффективность за счет использования метода фундаментальных решений для моделирования распространения волн. В работе [21] разработан метод для вычисления 2.5D эластодинамических функций Грина для слоистых полупространств в декартовых координатах. Метод позволяет получать точные решения для однородных и слоистых сред. В работе [22] предложена 2.5D методология МКЭ-МГЭ для анализа динамической реакции сегментированных тоннелей в насыщенном грунте. Метод позволяет учитывать влияние соединений тоннеля на динамические напряжения и давление поровой воды, что недооценивается в однородных моделях. В работе [23] представлен метод конечных элементов на основе границ (МКЭГ) для анализа напряжений в анизотропных функционально-градиентных материалах. Метод использует кусочно-однородные слои и позволяет учитывать эффекты анизотропии и градиентности без построения сетки области.

Многие современные научные работы посвящены оптимизации и анализу напряжений в гетерогенных, композитных и функционально-градиентных материалах. В работе [24] предложен стабилизированный метод iRBF для анализа упругопластических задач. Метод позволяет минимизировать вычислительные затраты и обеспечивает высокую точность. В работе [25] разработан подход для топологической оптимизации демпфирующих слоев под гармоническими возбуждениями. Метод использует кусочно-постоянный уровень и анализ чувствительности.

Результаты работ в данной области позволяют выполнять анализ широкого спектра сложных систем, однако проблема анализа динамики системы многослойного основания с частично заглубленным объектом является недостаточно изученной. Цели работы — анализ характеристик напряженно-деформированного состояния сложной конструкции на многослойном основании с использованием связи МКЭ-МГЭ и сравнительный анализ эффективности применения различных технологий параллельных вычислений для оптимизации вычисления данных характеристик. Достижение этих целей требует рассмотрения методики моделирования многослойного основания комбинацией данных методов и рассмотрения задачи по моделированию сложной конструкции с помощью разработанного программного средства, реализующего данную методику с применением технологий параллельных вычислений на базе языка Fortran.

Материалы и методы. Уравнение Ламе представляет собой фундаментальное описание движения изотропной линейно-упругой среды в перемещениях, связывая упругие константы Ламе с векторным полем смещений и объёмными силами. Применение интегрального преобразования Фурье к этому уравнению позволяет перейти от дифференциальной постановки в пространственной области к алгебраическим соотношениям в частотной области, где фундаментальные решения становятся явными. Это служит основой для построения метода граничных элементов, в котором интегральные представления через преобразование Фурье используются для формирования систем граничных интегральных уравнений, сводящих трёхмерную задачу упругости к двумерной дискретизации границы.

Для иллюстрации данного перехода рассмотрим поведение некоторого объекта, расположенного на поверхности или частично заглубленного в многослойное полупространство в режиме установившихся гармонических с частотой ω колебаний. В качестве примера рассмотрим строительный объект, имеющий свайный фундамент. Решение задачи строится раздельно: для части слоистого грунта и объекта с фундаментом с использованием метода конечных элементов, что позволяет учесть все особенности проектирования объекта и фундамента, и оставшейся части основания на основе метода граничных интегральных уравнений (граничных элементов) (рис. 1).

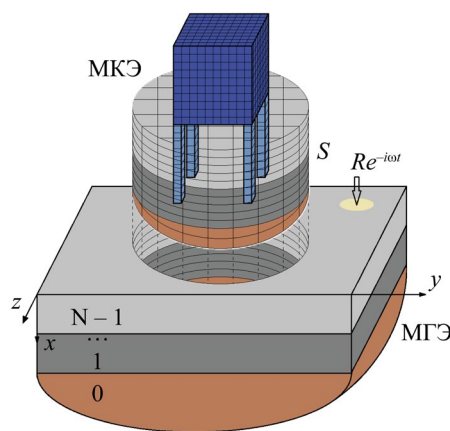


Рис. 1. Геометрия области

Поведение всех составляющих конструкции и N -слоистого основания считается линейно-упругим. При этом свойства среды в ее j -й составляющей описываются плотностью ρ_j и коэффициентами Ламе λ_j, μ_j ($j = 0, 1, \dots, N - 1$). Контакт всех сред предполагается жестким, определяющим равенство нормальных и касательных элементов векторов напряжений и перемещений на границах сопряжения.

Движение среды определяется решением системы уравнений Ламе относительно амплитудных функций перемещений точек среды [26]:

$$\nabla \nabla \cdot \mathbf{u}^{(j)}(\mathbf{r}) - \frac{\theta_{j1}^2}{\theta_{j2}^2} \nabla \times \nabla \times \mathbf{u}^{(j)}(\mathbf{r}) + \theta_{j1}^2 \mathbf{u}^{(j)}(\mathbf{r}) = 0, \mathbf{r} = \{x, y, z\}, \mathbf{u}^{(j)} = \{u_x^{(j)}, u_y^{(j)}, u_z^{(j)}\}, \mathbf{r} = \{x, y, z\}, \quad (1)$$

$$\theta_{j1}^2 = \frac{\omega^2 a^2}{V_{pj}^2}, \theta_{j2}^2 = \frac{\omega^2 a^2}{V_{sj}^2}, V_{pj} = \sqrt{\frac{\lambda_j + 2\mu_j}{\rho_j}}, V_{sj} = \sqrt{\frac{\mu_j}{\rho_j}}$$

Здесь система координат (x, y, z) связана с поверхностью многослойного полупространства, как показано на рис. 1.

Не ограничивая общности постановки задачи, считаем, что колебания возбуждаются распределенными в ограниченной области Ω усилиями на плоской границе полупространства при $x = 0$:

$$\mathbf{R}(y, z) = \{\sigma_x, \tau_{xy}, \tau_{xz}\} = \{R_1, R_2, R_{xz}\}.$$

При этом линейный параметр α в формуле (1) соответствует характерному размеру этой области. Замыкает постановку задачи требование удовлетворения решений принципу предельного поглощения [27].

Для описания динамического поведения нижней части, представляющей собой многослойное полупространство с выемкой при формально известном на его поверхности S векторе напряжений $\mathbf{t}$, а также заданных поверхностных напряжениях R_j , воспользуемся методом граничных интегральных уравнений на основе динамической теоремы взаимности и специальным построении матриц фундаментальных решений.

Вид матриц фундаментальных решений опирается на решение вспомогательной задачи о колебаниях однородного полупространства ($x > 0$) с упругими параметрами j -го слоя при заданном векторе напряжений $\mathbf{X}_1(y, z)$ на его поверхности $x = 0$ в локальной системе координат.

Для этого выразим поле перемещений в преобразованном по Фурье матричном виде:

$$\bar{\mathbf{u}}^{(j)}(x, \alpha, \beta) = \{\bar{u}_x, \bar{u}_y, \bar{u}_z\} = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} e^{i\alpha y + i\beta z} \mathbf{u}^{(j)}(\mathbf{r}) dx dy = \mathbf{U}^{(j)}(x, \alpha, \beta) \cdot \mathbf{C}(\alpha, \beta);$$

$$\mathbf{U}^{(j)}(x, \alpha, \beta) = \begin{pmatrix} -\sigma_{j1} e^{-\sigma_{j1} x} & -i\alpha e^{-\sigma_{j2} x} & i\beta \sigma_{j2} e^{-\sigma_{j2} x} \\ -i\alpha e^{-\sigma_{j1} x} & \sigma_{j2} e^{-\sigma_{j2} x} & -\alpha \beta e^{-\sigma_{j2} x} \\ -i\beta e^{-\sigma_{j1} x} & 0 & \xi_2^2 e^{-\sigma_{j2} x} \end{pmatrix}; \quad (2)$$

$$\xi_2^2 = \theta_{j2}^2 - \beta^2, \quad \sigma_{jk}^2 = u^2 - \theta_{jk}^2, \quad u^2 = \alpha^2 + \beta^2, \quad k = 1, 2.$$

Аналогично может быть представлен вектор напряжений:

$$\bar{\mathbf{t}}^{(j)}(x, \alpha, \beta) = \{\bar{\sigma}_x, \bar{\tau}_{xy}, \bar{\tau}_{xz}\} = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} e^{i\alpha y + i\beta z} \mathbf{t}^{(j)}(\mathbf{r}) dx dy = \mathbf{B}^{(j)}(x, \alpha, \beta) \cdot \mathbf{C}(\alpha, \beta);$$

$$\mathbf{B}^{(j)}(x, \alpha, \beta) = \begin{pmatrix} \xi_2^2 e^{-\sigma_{j1} x} & 2i\alpha \sigma_{j2} e^{-\sigma_{j2} x} & -2i\beta \sigma_{j2}^2 e^{-\sigma_{j2} x} \\ 2i\alpha \sigma_{j1} e^{-\sigma_{j1} x} & -(\sigma_{j2}^2 + \alpha^2) e^{-\sigma_{j2} x} & 2\alpha \beta \sigma_{j2} e^{-\sigma_{j2} x} \\ 2i\beta \sigma_{j1} e^{-\sigma_{j1} x} & -\alpha \beta e^{-\sigma_{j2} x} & \sigma_{j2} (\beta^2 - \xi_2^2) e^{-\sigma_{j2} x} \end{pmatrix};$$

$$\xi_2^2 = u^2 + \sigma_{j2}^2.$$

Вектор $\mathbf{C}(\alpha, \beta)$ определяется из граничного условия на поверхности $x = 0$ в форме:

$$\mathbf{C}(\alpha, \beta) = \mathbf{B}^{(j)-1}(0, \alpha, \beta) \cdot \bar{\mathbf{X}}_1(\alpha, \beta);$$

$$\mathbf{B}^{(j)-1}(0, \alpha, \beta) = \begin{pmatrix} \xi_2^2 \xi_2^2 & 2i\alpha \sigma_{j2} \xi_2^2 & 2i\beta \sigma_{j2} \xi_2^2 \\ 2i\alpha \sigma_{j1} \theta_{j2}^2 & -\xi_2^2 \xi_2^2 + \beta^2 \eta^2 & -2\alpha \beta [2\sigma_{j1} \sigma_{j2} - \xi_2^2] \\ 2i\beta \sigma_{j1} \sigma_{j2} & -\alpha \beta \frac{\eta^2}{\sigma_{j2}} & \frac{[\alpha^2 \eta^2 - \xi_2^2 \sigma_{j2}^2]}{\sigma_{j2}} \end{pmatrix} \Delta_R^{-1} \xi_2^{-2};$$

$$\Delta_R = \xi_2^4 - 4u^2 \sigma_{j1} \sigma_{j2}, \eta^2 = 4\sigma_{j1} \sigma_{j2} - \xi_2^2.$$

Полученные матричные представления в аналитическом виде позволяют легко перейти к решению задачи для слоя и многослойного полупространства, а также эффективно применять методы распараллеливания вычислений.

Для построения матриц фундаментальных решений считаем, что в точке $\mathbf{r}_0 = (x_0, y_0, z_0)$ j -го упругого слоя $0 < x < h_j$ действует сосредоточенное усилие:

$$\mathbf{q} = \{q_1, q_2, q_3\} = \{q_x, q_y, q_z\}.$$

Тогда смещения точки с координатами (x, y, z) , удовлетворяющие уравнению (1) с добавлением в левой части слагаемого для объемной силы $\mathbf{q}\delta(\mathbf{r} - \mathbf{r}_0)$ представляют собой интеграл вида:

$$U_{lk}^*(\mathbf{r}_0, \mathbf{r}) = \frac{a}{4\pi^2 \mu_j} \int_{\Gamma_1} \int_{\Gamma_2} e^{-i\alpha(y-y_0) - i\beta(z-z_0)} \bar{U}_{lk}^*(x, x_0, \alpha, \beta) d\alpha d\beta; l, k = 1, 2, 3. \quad (3)$$

Аналогично этому определяются фундаментальные решения для напряженного состояния для слоя с источником в виде двойного преобразования Фурье:

$$T_{lkp}^*(\mathbf{r}_0, \mathbf{r}) = \frac{a}{4\pi^2} \int_{\Gamma_1} \int_{\Gamma_2} e^{-i\alpha(y-y_0) - i\beta(z-z_0)} \bar{T}_{lkp}^*(x, x_0, \alpha, \beta) d\alpha d\beta; l, k, p = 1, 2, 3. \quad (4)$$

Для построения матриц фундаментальных решений $\bar{U}_{lk}^*(x, x_0, \alpha, \beta)$ в преобразованном по Фурье виде используется принцип суперпозиции решений трех задач:

$$\bar{\mathbf{U}}^*(x, x_0, \alpha, \beta) = \bar{\mathbf{u}}^{(j)}(x, \alpha, \beta) + \bar{\mathbf{u}}_h^{(j)}(x, \alpha, \beta) + \bar{\mathbf{U}}_0^{(j)}(x, x_0, \alpha, \beta). \quad (5)$$

где $\bar{\mathbf{u}}^{(j)}(x, \alpha, \beta)$, соответствующее формуле (2), представляет собой поле излучаемых и отраженных волн от границы слоя $x = 0$; $\bar{\mathbf{u}}_h^{(j)}(x, \alpha, \beta)$ — поле излучаемых и отраженных волн от границы слоя $x = h$; $\bar{\mathbf{U}}_0^{(j)}(x, x_0, \alpha, \beta)$ — поле источника колебаний в безграничном пространстве; $\bar{\mathbf{u}}_h^{(j)}(x, \alpha, \beta)$ легко получить из $\bar{\mathbf{u}}^{(j)}(x, \alpha, \beta)$ путем перехода к новой системе координат: $x \rightarrow h - x$, изменении знаков у ортов $\mathbf{e}_x$, $\mathbf{e}_z$ и введении нового вектора напряжений $\bar{\mathbf{X}}_2(\alpha, \beta)$ вместо $\bar{\mathbf{X}}_1(\alpha, \beta)$.

Компоненты матрицы $\bar{\mathbf{U}}_0^{(j)}(x, x_0, \alpha, \beta)$ можно найти применением формул переразложения сферических волн по набору плоских в форме двойного интеграла Фурье [28], что приводит к результату:

$$\begin{aligned} \bar{U}_{0,11}^{(j)} &= A \left[-\sigma_{j1} E_1^- + u^2 \frac{E_2^-}{\sigma_{j2}} \right], \\ \bar{U}_{0,12}^{(j)} &= \bar{U}_{0,21}^{(j)} = -iA\alpha \left[E_1^- - E_2^- \right] \text{sign}(x - x_0), \\ \bar{U}_{0,13}^{(j)} &= \bar{U}_{0,31}^{(j)} = -iA\beta \left[E_1^- - E_2^- \right] \text{sign}(x - x_0), \\ \bar{U}_{0,23}^{(j)} &= \bar{U}_{0,32}^{(j)} = A\alpha\beta \left[\frac{E_1^-}{\sigma_{j1}} - \frac{E_2^-}{\sigma_{j2}} \right], \\ \bar{U}_{0,22}^{(j)} &= A \left[\alpha^2 \frac{E_1^-}{\sigma_{j1}} - (\alpha^2 - \theta_{j2}^2) \frac{E_2^-}{\sigma_{j2}} \right], \\ \bar{U}_{0,33}^{(j)} &= A \left[\beta^2 \frac{E_1^-}{\sigma_{j1}} - (\beta^2 - \theta_{j2}^2) \frac{E_2^-}{\sigma_{j2}} \right], \\ A &= \frac{1}{2\theta_{j2}^2}, u^2 = \alpha^2 + \beta^2, \\ E_k^- &= e^{-\sigma_{jk}|x-x_0|}, \sigma_{jk} = \sqrt{u^2 - \theta_{jk}^2}, k = 1, 2. \end{aligned}$$

Аналогичное представление имеют и компоненты напряжений $\bar{T}_{lkp}^*(x, x_0, \alpha, \beta)$. В случае, если источник колебаний отсутствует в выбранном j -м слое, третье слагаемое в представлении (5) исключается.

Для окончательного определения фундаментальных решений необходимо исключить вектор-функции $\bar{\mathbf{X}}_1(\alpha, \beta)$, $\bar{\mathbf{X}}_2(\alpha, \beta)$ для каждой компоненты многослойного полупространства. Это реализуется применением условий непрерывности векторов смещений и напряжений $u^{(j+1)} = u^{(j)}$, $t^{(j+1)} = t^{(j)}$ в форме преобразований Фурье при переходе через границы $x = x_j, j = 0, 1, \dots, N-2$ раздела j -й и $(j+1)$ -й компонент слоистой среды, а также условий свободной границы при $x = 0$. Полученная система линейных алгебраических уравнений и ее определитель определяют дисперсионные свойства многослойного полупространства.

С использованием динамической теоремы взаимности далее получим граничные интегральные уравнения на поверхности S для узловых значений векторов перемещений и напряжений, имеющие следующий вид [29]:

$$\begin{aligned} &\frac{1}{2} u_l(\mathbf{r}_0) + \iint_S \sum_{p=1}^3 \left\{ \sum_{k=1}^3 T_{lkp}^*(\mathbf{r}_0, \mathbf{r}) n_k(\mathbf{r}) \right\} u_p(\mathbf{r}) ds = \\ &= \iint_S \sum_{k=1}^3 U_{lk}^*(\mathbf{r}_0, \mathbf{r}) \tau_k(\mathbf{r}) ds - \iint_{\Omega} \sum_{k=1}^3 U_{lk}^*(\mathbf{r}_0, \mathbf{r}) R_k(y) dy; l = 1, 2, 3. \end{aligned} \quad (6)$$

Здесь u_p, τ_k — компоненты векторов напряжений и перемещений соответственно; U_{lk}^*, T_{lkp}^* — компоненты построенных матриц фундаментальных перемещений и напряжений в точке $\mathbf{r}$ от действия источника в точке $\mathbf{r}_0$; R_k — компоненты вектора внешних усилий на границе полупространства; n_k — компоненты вектора внешней нормали к S .

Путем дискретизации системы (6) методом линейных граничных элементов получена СЛАУ относительно неизвестных узловых перемещений $\mathbf{u}_S$ и сил $\mathbf{F}_S$:

$$\mathbf{A} \cdot \mathbf{u}_S + \mathbf{B} \cdot \mathbf{F}_S = \mathbf{b}(R_k). \quad (7)$$

Рассматриваемая задача сводится к совместному решению СЛАУ МГЭ и уравнения движения по МКЭ [30]:

$$[\mathbf{K} - i\omega\mathbf{C} - \omega^2\mathbf{M}] \cdot \mathbf{u} = \mathbf{F}. \quad (8)$$

Здесь $\mathbf{M}$ — матрица масс; $\mathbf{C}$ — матрица сопротивлений; $\mathbf{K}$ — матрица жесткости конструкции; $\mathbf{u}$ — амплитудные функции вектора узловых перемещений; $\mathbf{F}$ — вектор узловых нагрузок; ω — частота установившихся колебаний. Отметим, что векторы $\mathbf{u}$ и $\mathbf{F}$ содержат переменные для узлов, лежащих на общей границе S , и являющиеся неизвестными величинами.

После совместного решения СЛАУ (7, 8), выполняется подстановка полученного решения в известные представления волновых полей (2, 3, 4), что позволяет рассчитать динамические характеристики напряженно-деформированного состояния многослойного основания и рассмотреть его взаимодействие со связанным полузаглубленным объектом.

Рассмотрим задачу определения нормальных напряжений вдоль оси X в заданной точке трехслойного пространственного основания, подверженного поверхностному динамическому воздействию в частотном диапазоне 15-25 Гц. Нижний слой основания является упругим полупространством, а на поверхности расположена строительная конструкция в виде тонкостенного стального куба с полузаглубленным бетонным фундаментом (рис. 2).

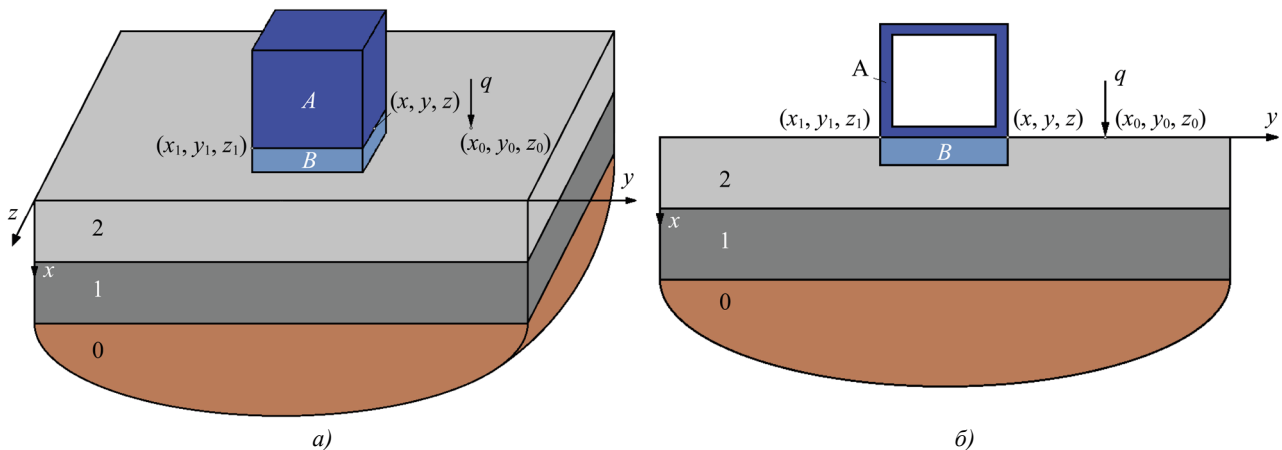


Рис. 2. Геометрия области
а — общий план; б — срез

Рассматривается несколько случаев постановки задачи — при наличии и отсутствии строительной конструкции, а также при различных конфигурациях жесткости сред основания. Физические свойства слоев основания и элементов конструкции отражены в таблицах 1 и 2 соответственно, где ρ — плотность; E — модуль Юнга; ν — коэффициент Пуассона.

Таблица 1

Параметры слоев основания

Номер слоя	Толщина, м	ρ , кг/м ³	E , МПа, вариант (а)	E , МПа, вариант (б)	E , МПа, вариант (в)	ν
0	Полупространство	1800	3,915	39,150	391,500	0,330
1	1	1800	39,150	39,150	39,150	0,330
2	1	1800	391,500	39,150	3,915	0,330

Параметры элементов конструкции

Наименование	Габариты, м	ρ , кг/м ³	E , ГПа	ν
A	2x2x2, Толщина стенки – 0,150	7850	200	0,300
B	0,500x2x2	2450	27	0,200

Нагрузка $q = 1$ кПа приложена на поверхности в точке $(x_0; y_0; z_0) = (0; 4,7; 0)$, один из нижних углов куба расположен в точке $(x_1; y_1; z_1) = (0; -1; -1)$, координаты точки наблюдения $(x; y; z) = (0; 1; 0)$.

Для решения поставленной задачи используется комбинация разработанного авторами программного продукта, реализующего рассмотренный механизм определения характеристик напряженно-деформированного состояния многослойного основания методом граничных элементов и комплекса ANSYS Mechanical для анализа конструкции и окружающего грунта методом конечных элементов. Численный эксперимент проводился на ПК с процессором Intel Core i5-13600k и 32 Гб оперативной памяти с частотой 6000 МГц/с.

Результаты исследования. Получены данные об амплитудно-частотных характеристиках точки наблюдения (рис. 3).

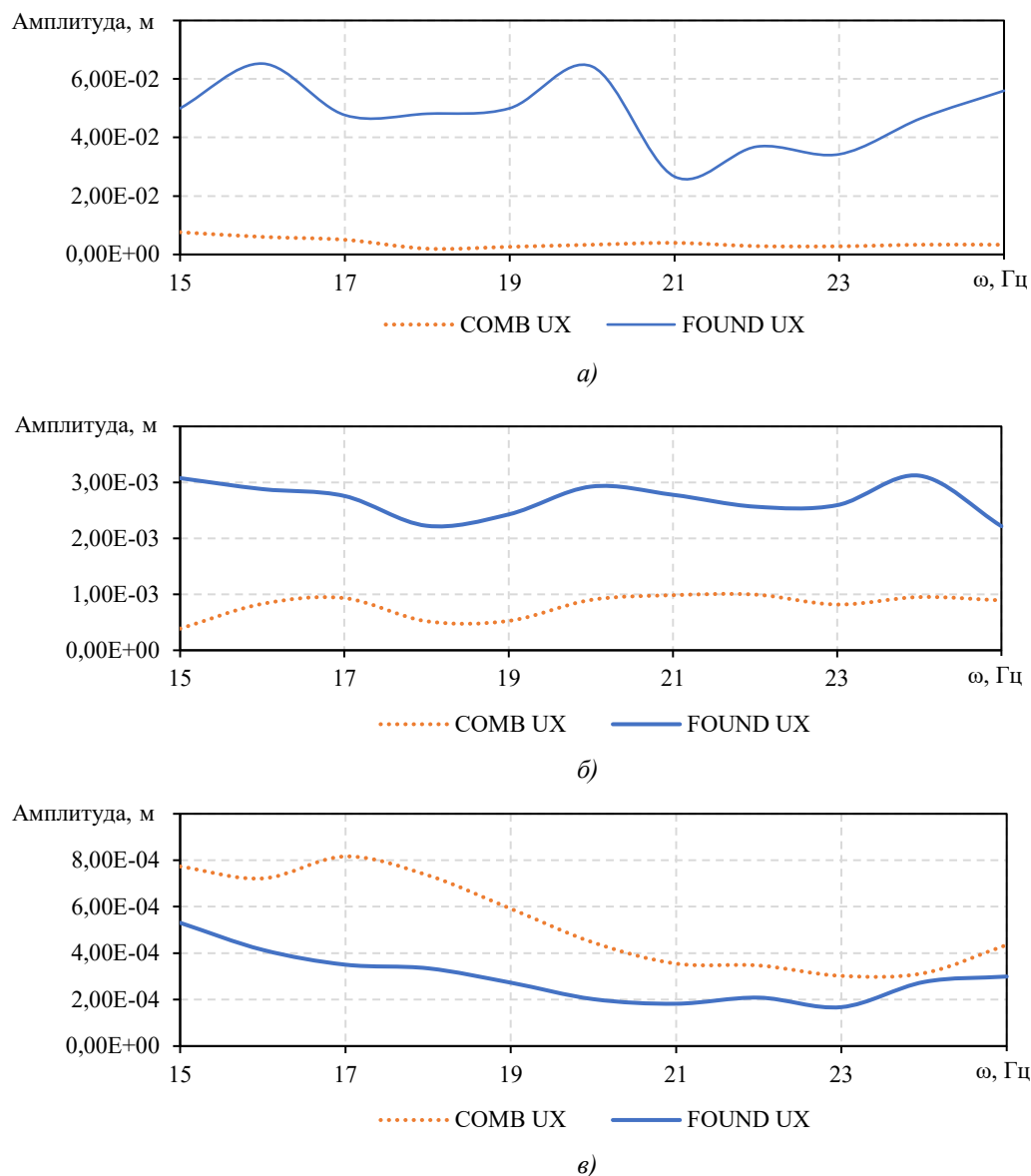


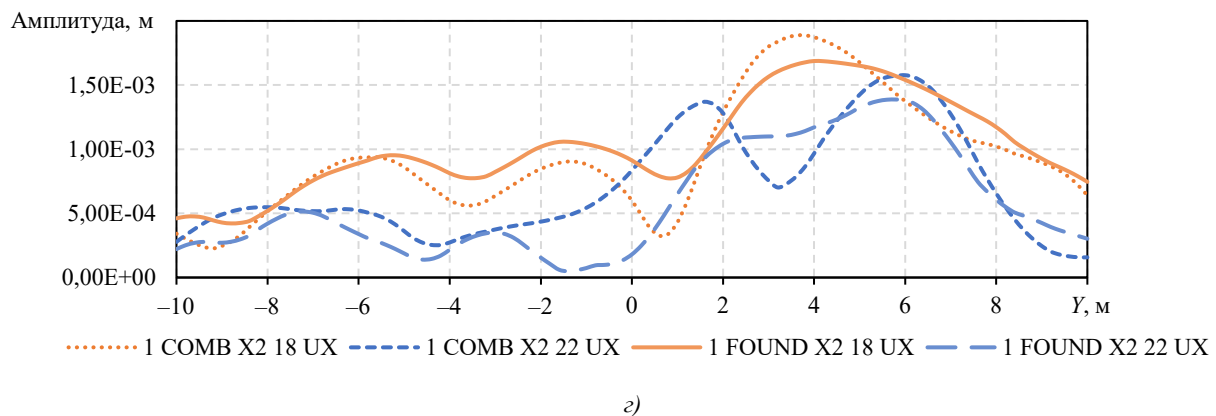
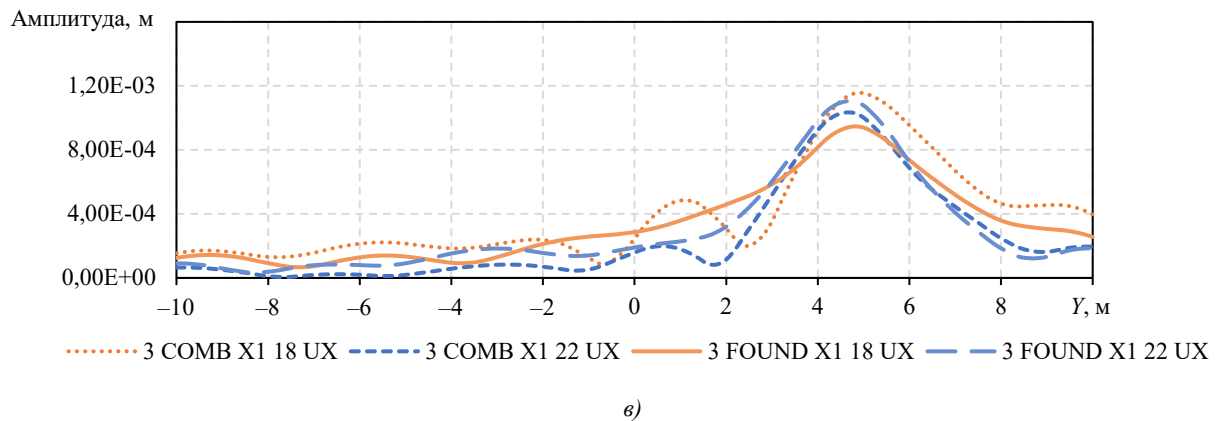
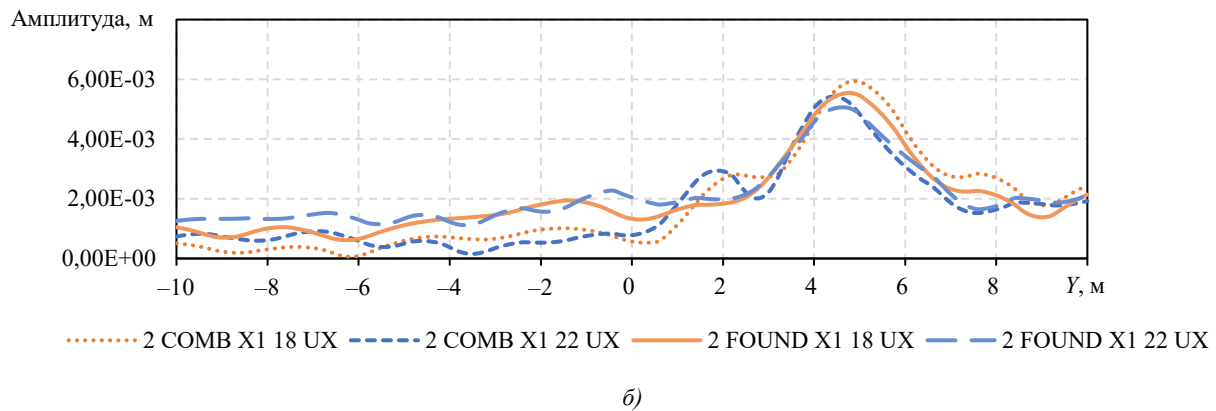
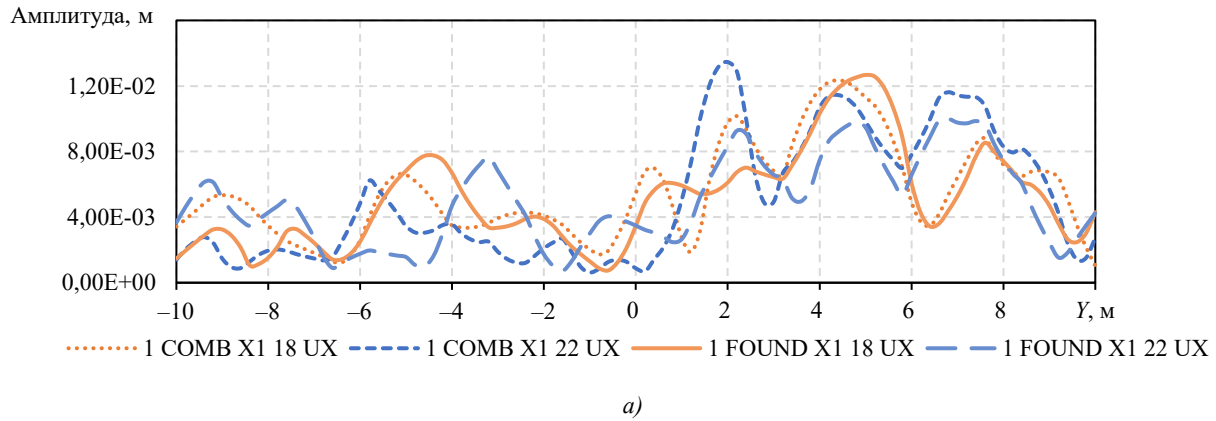
Рис. 3. АЧХ (UX) точки на границе конструкции при наличии (COMB) и отсутствии (FOUND) конструкции:

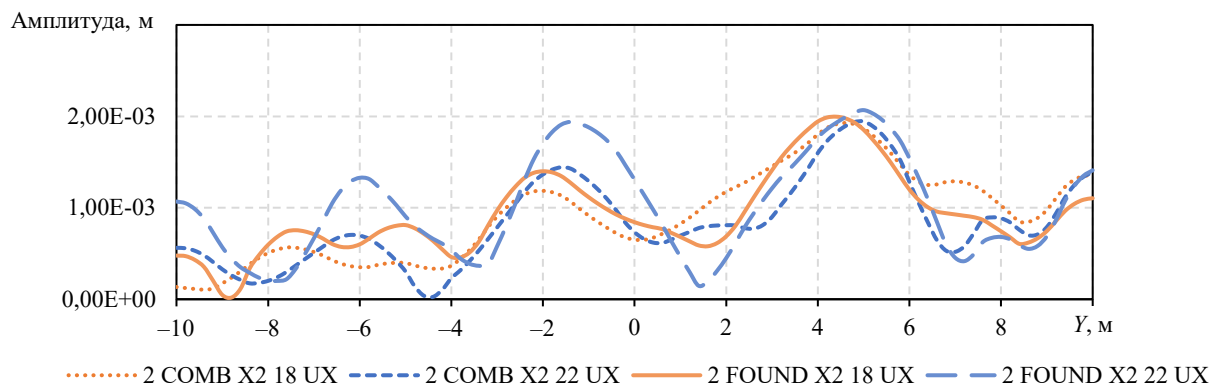
а — при увеличении жесткости сред от полупространства к поверхности;

б — с равной жесткостью сред; в — при уменьшении жесткости сред

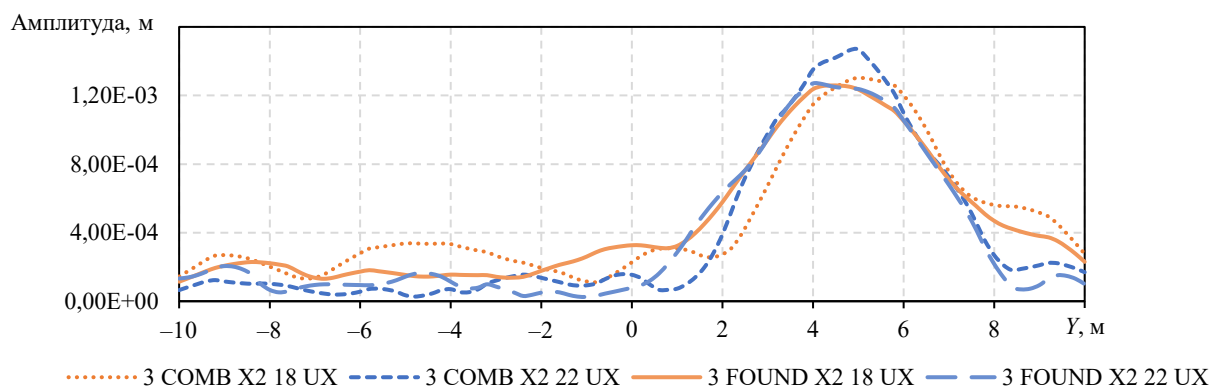
Для вариантов *а* и *б* (жесткие поверхностные слои и слои равной жесткости) наличие конструкции уменьшает перемещение рассматриваемой точки, поведение которой становится более монотонным. В последнем случае (*в*) в большей степени проявляются низкочастотные конечные резонансы конструкции, а амплитуды увеличиваются.

Дополнительно получены данные о перемещении точек основания на границах раздела слоев на отрезке под конструкцией, результаты представлены на рис. 4. Графики *а–в* соответствуют нижней границе раздела верхнего и нижнего слоев, а варианты *г–е* — плоскости раздела нижнего слоя и полупространства.





д)



е)

Рис. 4. АЧХ (UX) точек основания частотах 18 и 22 Гц при наличии (COMB) и отсутствии (FOUND) конструкции: *a* — на отрезке $[(-1, -10, 0); (-1, 10, 0)]$ при увеличении жесткости сред; *b* — на отрезке $[(-1, -10, 0); (-1, 10, 0)]$ с равной жесткостью сред; *в* — на отрезке $[(-1, -10, 0); (-1, 10, 0)]$ при уменьшении жесткости сред; *г* — на отрезке $[(-2, -10, 0); (-2, 10, 0)]$ при увеличении жесткости сред; *д* — на отрезке $[(-2, -10, 0); (-2, 10, 0)]$ с равной жесткостью сред; *е* — на отрезке $[(-2, -10, 0); (-2, 10, 0)]$ при уменьшении жесткости сред

Сравнение графиков позволяет сделать вывод о существенной зависимости вертикальных перемещений в первую очередь от строения основания. Наличие конструкции при этом добавляет дополнительные максимумы по перемещениям, в особенности для мягких поверхностных слоев.

Проведенные расчеты потребовали значительных затрат временных ресурсов, что привело к необходимости рассмотрения использования параллельных вычислений. В результате применения представленного метода были рассмотрены задачи распараллеливания при построении фундаментальных решений для МГЭ.

В рамках вычисления фундаментальных решений вектор напряжений был вычислен 3 096 676 раз, средствами отладки получено итоговое время работы программного модуля 56.1 с., процессорное время 55 с.

Рассмотрим реализацию различных методик распараллеливания вычислений в программе на языке Fortran. Используем три технологии: Fortran Coarray, Message-Passing Interface (MPI) и OpenMP.

Coarray — это технология, в рамках которой программа на Fortran реплицируется на нескольких процессорах (образах). Данная технология внедрена в Fortran 2008 для поддержки параллельного программирования. Она предоставляет простой и интуитивно понятный синтаксис для выполнения параллельных вычислений без явной передачи сообщений. В Fortran Coarray — это переменная с одной или несколькими объявленными дополнительными соразмерностями. Каждый образ имеет собственную локальную копию данных Coarray [31].

MPI, или интерфейс передачи сообщений, представляет собой стандартизованную и портативную систему передачи сообщений, предназначенную для облегчения связи и координации между параллельными процессами в среде параллельных вычислений с распределенной памятью. MPI обычно используется в приложениях высокопроизводительных вычислений (HPC) для обеспечения связи между несколькими процессами, работающими на разных узлах кластера. В Fortran MPI предоставляет набор вызовов подпрограмм, которые обеспечивают прямую связь между параллельными процессами [32].

OpenMP (открытая многопроцессорная обработка) — это API, который поддерживает кроссплатформенное параллельное программирование с общей памятью на C, C++ и Fortran. OpenMP упрощает разработку параллельных программ, предоставляя набор директив компилятора и библиотечных процедур для выражения параллелизма в коде [33]. Эта технология особенно хорошо подходит для распараллеливания на уровне циклов и областей. OpenMP контролирует безопасность потоков, включая обработку частных и общих переменных. К недостаткам OpenMP можно отнести необходимость учета потенциальных условий конкуренции за данные и ручной синхронизации.

В исходное программное решение внесены модификации для обеспечения параллельных вычислений. В ходе эксперимента выполнено распределение нагрузки на 2, 4, 6 и 8 потоков (образов), результаты представлены в таблицах 3, 4 и на рис. 5.

Таблица 3

Реальное время работы программного модуля

# образов	Время, с		
	Coarray	MPI	OpenMP
2	37,664	38,962	38,440
4	26,472	27,561	27,759
6	18,348	19,432	19,443
8	14,135	15,158	15,334

Таблица 4

Затраченное процессорное время

# образов	Время, с		
	Coarray	MPI	OpenMP
2	91,350	57,063	58,350
4	89,034	63,250	61,100
6	82,330	66,259	63,080
8	75,537	66,858	71,159

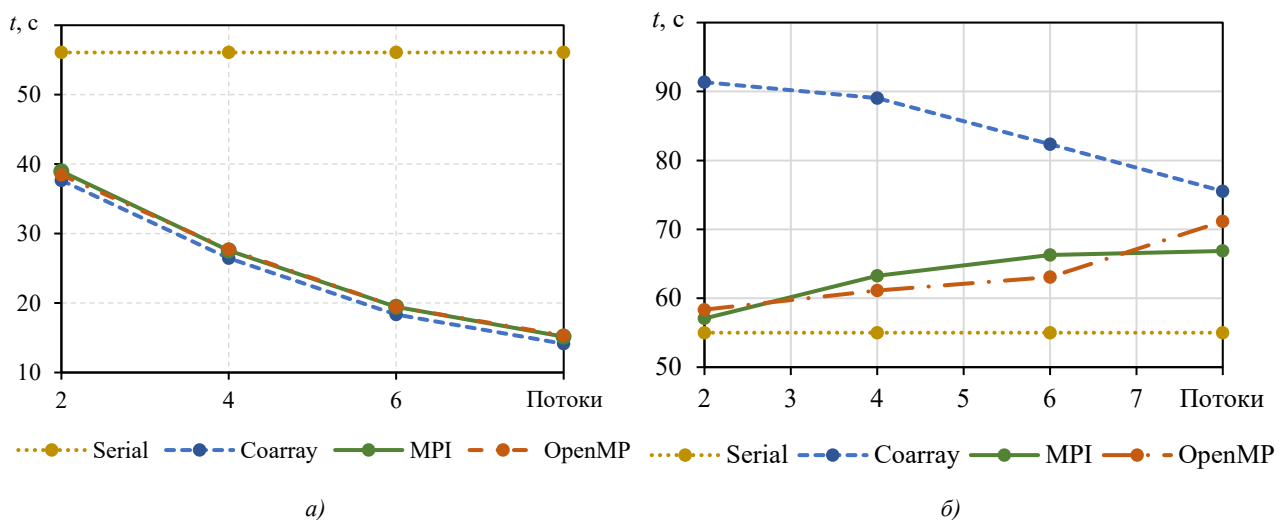


Рис. 5. Сравнение времени работы программных модулей, с.: а — реальное время выполнения; б — процессорное время

Обсуждение. Полученные результаты подтверждают теоретические представления о взаимном влиянии строительного объекта с фундаментом и окружающего его грунтового массива. Анализ зависимости вертикальных перемещений точки многослойного основания от конфигурации слоев данного основания и наличия конструкции с полузаглубленным фундаментом в окрестностях этой точки позволил получить ожидаемые результаты. В конфигурации среды, где на поверхности сильносжимаемого полупространства расположены слои более жестких материалов, внедрение конструкции и полузаглубленного фундамента с еще большей жесткостью позволяет снизить колебания соседних точек от действия поверхностной нагрузки. Аналогичный результат наблюдается при рассмотрении малосжимаемой среды равномерной жесткости. В случае обратной конфигурации — когда толщина жесткого полупространства покрыта слоями упругого грунта, наличие строительного объекта может привести к усилению резонансных явлений, особенно на низких частотах.

Анализ перемещения точек отрезка в рассматриваемой области позволил выполнить оценку влияния рассмотренных факторов на напряженно-деформированное состояние точек среды с учетом пространственных факторов. Так, ожидаемо, наибольшие перемещения наблюдаются в окрестностях точки приложения нагрузки и постепенно снижаются с увеличением дистанции. Выбранные для анализа частоты 18 и 22 Гц являются собственными частотами строительного объекта и были получены в результате модального анализа.

В связи с тем, что решение данной задачи является ресурсоемким процессом и требует значительных временных затрат, применение технологий параллельных вычислений для оптимизации расчетов является естественным этапом развития программного продукта. Анализ затрат времени на вычисление фундаментальных решений с использованием технологий Coarray, MPI и OpenMP показал высокую степень схождения прироста производительности для всех трех методов, что свидетельствует о зрелости данных технологий в рамках инструментария языка Fortran. При переходе от последовательной реализации к двухпоточной наблюдается сокращение времени выполнения расчетов на ~30 %. Увеличение числа потоков на два демонстрирует схожий относительный прирост производительности. Данная тенденция прослеживается и далее. Таким образом, дальнейшее увеличение числа потоков и, соответственно, задействованных ядер процессора, приведет к снижению затрат времени на расчеты, но в абсолютных значениях разница во времени для большого числа потоков будет невелика. Об этом свидетельствует и рост затраченного процессорного времени с увеличением числа потоков для технологий MPI и OpenMP, который связан с увеличением затрат времени на синхронизацию параллельных процессов. Отличия в поведении реализации программного модуля на базе Coarray могут быть обусловлены повышенными затратами времени на инициализацию параллельных образов или, потенциально, связаны с особенностями выполнения программного средства на данном оборудовании. Более ранние исследования показывают, что дальнейшее увеличение числа образов Coarray приведет к схожим затратам процессорного времени относительно других технологий.

Заключение. В соответствии с полученными результатами можно сделать вывод, что использованная технология матричного построения фундаментальных решений для многослойных сред с поверхностными и заглубленными объектами является эффективным инструментом, позволяющим точно учесть дисперсионные свойства многослойной среды, условия излучения энергии на бесконечность при взаимодействии объекта и основания, а также естественным образом распараллелить вычислительные процессы при совместном применении методов граничных интегральных уравнений и конечных элементов. Применение технологий Coarray, MPI и OpenMP для параллельных вычислений позволяет кратно снизить время работы программного модуля, не приводя к значительному увеличению затрат ресурсов. Применение различных технологий дает схожий прирост производительности программного модуля, а различия в затратах процессорного времени связаны с особенностями реализации технологии распараллеливания. Выбор оптимальной технологии зависит от конкретной реализации приложения и ограничений выбранной платформы. Так, в случае компиляции разработанного модуля в качестве DLL-библиотеки и интеграции в комплексное решение необходимо учитывать, что для работы технологии Coarray базовое приложение также должно быть реализовано на Fortran, а инициализация MPI-приложений происходит через утилиту mpixes. В качестве альтернативы рассмотренным технологиям предлагается использовать OpenCL, OpenACC и CUDA, позволяющих проводить эффективные вычисления с использованием графических ускорителей. Исследование методик применения данных технологий для анализа сложных систем строительных конструкций и многослойных оснований является одним из приоритетных направлений дальнейших исследований.

Список литературы / References

1. Ni Guangcong, Tiraturyan AN, Uglova EV, Vorobev AV. Study on Dynamic Response Characteristics of Different Asphalt Pavement Structures Based on ALF Test. *Advanced Engineering Research (Rostov-on-Don)*. 2023;23(3):241–256. <https://doi.org/10.23947/2687-1653-2023-23-3-241-256>
2. Babushkina NE, Lyapin AA. Determination of Dynamic Stresses and Displacements under the Action of an Impact Load on a Two-Layer Structure during the Indentation Process. *Advanced Engineering Research (Rostov-on-Don)*. 2024;24(3):264–273. <https://doi.org/10.23947/2687-1653-2024-24-3-264-273>
3. Soares D, Godinho L. Nonlinear Analysis of Interacting Saturated Porous and Elastic Media by Time-Domain FEM/BEM Iterative Coupling Procedures. *Engineering Analysis with Boundary Elements*. 2020;117:299–308. <https://doi.org/10.1016/j.enganabound.2020.05.006>
4. Soares D, Araújo FC. An Explicit Direct FEM–BEM Coupling Procedure for Nonlinear Dynamics. *Engineering Analysis with Boundary Elements*. 2019;103:94–100. <https://doi.org/10.1016/j.enganabound.2019.03.003>
5. Gimperlein H, Özdemir C, Stephan EP. A Time-Dependent FEM-BEM Coupling Method for Fluid-Structure Interaction in 3D. *Applied Numerical Mathematics*. 2020;152:49–65. <https://doi.org/10.1016/j.apnum.2020.01.023>
6. Dominguez V, Ganesh M. Analysis and Application of an Overlapped FEM-BEM for Wave Propagation in Unbounded and Heterogeneous Media. *Applied Numerical Mathematics*. 2022;171:76–105. <https://doi.org/10.1016/j.apnum.2021.08.015>

7. Mascotto L, Melenk JM, Perugia I, Rieder A. FEM-BEM Mortar Coupling for the Helmholtz Problem in Three Dimensions. *Computers & Mathematics with Applications*. 2020;80(11):2351–2378. <https://doi.org/10.1016/j.camwa.2020.04.014>
8. Ahmed SG. Numerical Solution of Moving Boundary Problems Using a New Hybrid Grid and Meshless Method. *Engineering Analysis with Boundary Elements*. 2019;103:22–31. <https://doi.org/10.1016/j.enganabound.2019.02.008>
9. Seibel D, Weißer S. Recovery-Based Error Estimators for the VEM and BEM-Based FEM. *Computers & Mathematics with Applications*. 2020;80(9):2073–2089. <https://doi.org/10.1016/j.camwa.2020.09.004>
10. Elwin van't Wout. Stable and Efficient FEM-BEM Coupling with OSRC Regularisation for Acoustic Wave Transmission. *Journal of Computational Physics*. 2022;450:110856. <https://doi.org/10.1016/j.jcp.2021.110867>
11. Linqi Yu, Yongqiang Qu, Bon-Heon Ku, Meng Zhang, Chin-Suk Hong, Jung Sub Lee, et al. Deep Learning Approach-Based Prediction of Transfer Functions in Structure-Acoustic Coupling Models. *Results in Engineering*. 2025;28:108054. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2025.108054>
12. Fuhang Jiang, Toru Takahashi, Changjun Zheng, Toshiro Matsumoto, Haibo Chen. Framework of Acoustic Analysis and Shape Optimization for Three-Dimensional Doubly Periodic Multilayered Structures. *Journal of Computational Physics*. 2025;520:113483. <https://doi.org/10.1016/j.jcp.2024.113483>
13. Chen Yang, Ruigang Qin, Sohichi Hirose. Semi-Analytical FEM for Modeling 2D Guided Wave Scattering by Interface Delamination in Composite Laminates. *Engineering Analysis with Boundary Elements*. 2025;179(A):106427. <https://doi.org/10.1016/j.enganabound.2025.106427>
14. Gilvey B, Trevelyan J. A Comparison of High-Order and Plane Wave Enriched Boundary Element Basis Functions for Helmholtz Problems. *Engineering Analysis with Boundary Elements*. 2021;122:190–201. <https://doi.org/10.1016/j.enganabound.2020.10.008>
15. Haijun Wu, Liang Yu, Weikang Jiang. A Coupling FEM/BEM Method with Linear Continuous Elements for Acoustic-Structural Interaction Problems. *Applied Acoustics*. 2019;150:44–54. <https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2019.02.001>
16. Hassell ME, Sayas F-J. A Fully Discrete BEM-FEM Scheme for Transient Acoustic Waves. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*. 2016;309:106–130. <https://doi.org/10.1016/j.cma.2016.05.035>
17. Zejun Han, Linqing Yang, Hongyuan Fang, Jin Zhang. Dynamic Stiffness of Three-Dimensional Anisotropic Multi-layered Media Based on the Continued-Fraction Method. *Applied Mathematical Modelling*. 2021;93:53–74. <https://doi.org/10.1016/j.apm.2020.11.045>
18. Zejun Han, Linqing Yang, Hongyuan Fang, Jin Zhang. Transient Analysis of Three-Dimensional Dynamic Interaction between Multilayered Soil and Rigid Foundation. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*. 2020;121(19):4406–4434. <https://doi.org/10.1002/nme.6439>
19. Mehdizadeh D, Eskandari-Ghadi M, Rahimian M. A 3D BEM-FEM Approach Using Layered Transversely Isotropic Half-Space Green's Functions in the Frequency Domain for SSI Analyses. *Engineering Analysis with Boundary Elements*. 2021;132:94–109. <https://doi.org/10.1016/j.enganabound.2021.07.005>
20. Liravi H, Arcos R, Ghangale D, Noori B, Romeu J. A 2.5D Coupled FEM-BEM-MFS Methodology for Longitudinally Invariant Soil-Structure Interaction Problems. *Computers and Geotechnics*. 2021;132:104009. <https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2021.104009>
21. Noori B, Arcos R, Romeu J, Clot A. A Method Based on 3D Stiffness Matrices in Cartesian Coordinates for Computation of 2.5D Elastodynamic Green's Functions of Layered Half-Spaces. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*. 2018;114:154–158. <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2018.07.031>
22. Shunhua Zhou, Chao He, Peijun Guo, Fan Yu. Dynamic Response of a Segmented Tunnel in Saturated Soil Using a 2.5D FE-BE Methodology. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*. 2019;120:386–397. <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2019.02.017>
23. Xuan Thanh Nguyen, Van Thuong Nguyen, Nguyen Dinh Duc. Boundary-Based Finite Element Method for Anisotropic Functionally Graded Materials. *Engineering Analysis with Boundary Elements*. 2025;181:106526. <https://doi.org/10.1016/j.enganabound.2025.106526>
24. Phuc LH Ho, Canh V Le. A Stabilized iRBF Mesh-Free Method for Quasi-Lower Bound Shakedown Analysis of Structures. *Computers and Structures*. 2020;228:106157. <https://doi.org/10.1016/j.compstruc.2019.106157>
25. Zhengfang Zhang, Weifeng Chen. An Approach for Topology Optimization of Damping Layer under Harmonic Excitations Based on Piecewise Constant Level Set Method. *Journal of Computational Physics*. 2019;390:470–489. <https://doi.org/10.1016/j.jcp.2019.04.022>
26. Babushkina NE, Lyapin AA. Solving the Problem of Determining the Mechanical Properties of Road Structure Materials Using Neural Network Technologies. *Advanced Engineering Research (Rostov-on-Don)*. 2022;22(3):285–292. <https://doi.org/10.23947/2687-1653-2022-22-3-285-292>
27. Бабешко В.А., Глушков Е.В., Зинченко Ж.З. *Динамика неоднородных линейно-упругих сред*. Москва: Наука; 1989. 343 с. URL: https://rusneb.ru/catalog/002744_000053_RU_%D0%93%D0%9F%D0%9D%D0%

[A2%D0%91+%D0%A0%D0%BE%D1%81%D1%81%D0%B8%D0%B8_KNB_IBIS_22.251.1_%D0%9112-559210/](#) (дата обращения: 28.06.2026)

Babeshko VA, Glushkov EV, Zinchenko ZhZ. *Dynamics of Inhomogeneous Linearly Elastic Media*. (In Russ.) Moscow: Nauka; 1989. 343 p. URL: https://rusneb.ru/catalog/002744_000053_RU_%D0%93%D0%9F%D0%9D%D0%A2%D0%91+%D0%A0%D0%BE%D1%81%D1%81%D0%B8%D0%B8_KNB_IBIS_22.251.1_%D0%9112-559210/ (accessed: 28.06.2026).

28. Ерофеев В.Т. Связь между основными решениями в цилиндрических и сферических координатах (с одинаковыми началами координат) для некоторых уравнений математической физики. *Дифференциальные уравнения*. 1973;9:1310–1317. URL: https://www.mathnet.ru/php/archive.phtml?wshow=paper&jmid=de&paperid=1959&option_lang=rus (дата обращения: 27.06.2026).

Erofeenko VT. Connection between the Fundamental Solutions in Cylindrical and Spherical Coordinates (with the Same Origin) for Certain Equations of Mathematical Physics. *Differential Equations*. 1973;9:1310–1317. URL: https://www.mathnet.ru/php/archive.phtml?wshow=paper&jmid=de&paperid=1959&option_lang=rus (accessed: 27.06.2026).

29. Бреббия К., Теллес Ж., Вроубел Л. *Методы граничных элементов*. Москва: Мир; 1987. 524 с. URL: https://www.studmed.ru/brebbiya-k-telles-zh-vroubel-l-metody-granichnyh-elementov_d782d59517f.html (дата обращения: 28.06.2026).

Brebbia C, Telles J, Wrobel L. *Boundary Element Methods*. (In Russ.) Moscow: Mir; 1987. 524 p. URL: https://www.studmed.ru/brebbiya-k-telles-zh-vroubel-l-metody-granichnyh-elementov_d782d59517f.html (accessed: 28.06.2026).

30. Розин Л.А. *Метод конечных элементов в применении к упругим системам*. Москва: Стройиздат; 1977. 129 с. URL: <https://biblioclub.ru/index.php?page=book&id=700836> (дата обращения: 11.08.2026).

Rozin LA. *Finite Element Method Applied to Elastic Systems*. (In Russ.) Moscow: Stroiizdat; 1977. 129 p. URL: <https://biblioclub.ru/index.php?page=book&id=700836> (accessed: 11.08.2026).

31. Reshetova G, Koynov V. Parallel Implementation of the Seismic Sources Recovery in Randomly Heterogeneous Media. In book: Voevodin V, Sobolev S., Yakobovskiy M, Shagaliev R (eds.) *Supercomputing. RuSCDays 2022. Lecture Notes in Computer Science*. Cham: Springer; 2022. P. 262–275. https://doi.org/10.1007/978-3-031-22941-1_19

32. Danielson KT, Namburu RR. Nonlinear Dynamic Finite Element Analysis on Parallel Computers Using FORTRAN 90 and MPI. *Advances in Engineering Software*. 1999;29(3-6):179–186. [https://doi.org/10.1016/S0965-9978\(98\)00019-2](https://doi.org/10.1016/S0965-9978(98)00019-2)

33. Lyapin AA, Glushko SG, Cherpakov AV. A Comparative Study of Fortran-Based Parallelization Methods in C# Applications. In book: Ivan A Parinov, Shun-Hsyung Chang, Erni Puspanantasari Putri (eds). *Physics and Mechanics of New Materials and Their Applications — 2023*. Cham: Springer; 2024. P. 255–263. URL: <https://link.springer.com/book/10.1007/978-3-031-52239-0> (accessed: 11.06.2026).

Об авторах:

Сергей Геннадьевич Глушко, преподаватель кафедры «Кибербезопасность информационных систем» Донского государственного технического университета (344003, Российская Федерация, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), [SPIN-код](#), [ORCID](#), [ScopusID](#), [ResearcherID](#), glsege98@yandex.ru

Александр Александрович Ляпин, доктор физико-математических наук, профессор кафедры «Кибербезопасность информационных систем» Донского государственного технического университета (344003, Российская Федерация, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), [SPIN-код](#), [ORCID](#), [ScopusID](#), [ResearcherID](#), [ResearchGate](#), lyapin.rnd@yandex.ru

Заявленный вклад авторов:

С.Г. Глушко: формальный анализ, проведение исследования, разработка программного обеспечения – написание программного кода и реализация вспомогательных алгоритмов, написание черновика рукописи.

А.А. Ляпин: разработка концепции, разработка методологии, валидация результатов, написание рукописи – внесение замечаний и исправлений.

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Декларация ИИ: авторы заявляют, что при подготовке текста рукописи не использовались технологии генеративного искусственного интеллекта (ИИ), ИИ не является соавтором публикации: авторство присвоено только физическим лицам, внёсшим существенный интеллектуальный вклад в исследование.

About the Authors:

Sergey G. Glushko, Lecturer of the Cybersecurity of Information Systems Department, Don State Technical University (1, Gagarin Sq., Rostov-on-Don, 344003, Russian Federation), [SPIN-code](#), [ORCID](#), [ScopusID](#), [ResearcherID](#), glsege98@yandex.ru

Alexander A. Lyapin, Dr.Sci. (Phys.-Math.), Professor of the Cybersecurity of Information Systems Department, Don State Technical University (1, Gagarin Sq., Rostov-on-Don, 344003, Russian Federation), [SPIN-code](#), [ORCID](#), [ScopusID](#), [ResearcherID](#), [ResearchGate](#), lyapin.rnd@yandex.ru

Claimed Contributorship:

SG Glushko: formal analysis, investigation, software, writing — original draft preparation.

AA Lyapin: conceptualization, methodology, validation, writing — review & editing.

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

All authors have read and approved the final manuscript.

AI Declaration: the authors declare that generative artificial intelligence (AI) technologies were not used in the preparation of the manuscript and that AI is not a co-author of the publication: authorship is assigned only to natural persons who have made a substantial intellectual contribution to the research.

Поступила в редакцию / Received 06.06.2026

Поступила после рецензирования / Reviewed 16.07.2026

Принята к публикации / Accepted 03.08.2026

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



УДК 631.527

Оригинальное теоретическое исследование

<https://doi.org/10.23947/2687-1653-2026-26-3-2660>

Расчётная оценка влияния разрядности ШИМ-управления LED-досветкой на фотосинтетический отклик растений

В.В. Самойленко¹ , В.В. Федоренко² 
¹ Ставропольский государственный аграрный университет, г. Ставрополь, Российская Федерация, <https://ror.org/02x91aj62>
² Северо-Кавказский федеральный университет, г. Ставрополь, Российская Федерация, <https://ror.org/05g1k4d79>
✉ samoilenko.vv@stgau.ru

EDN: DAFFXA

Аннотация

Введение. Сельское хозяйство в контролируемой среде (Controlled-environment agriculture, CEA) становится одной из ключевых платформ Agriculture 4.0, где датчики, киберфизические системы и искусственный интеллект обеспечивают тонкое управление световым режимом и ресурсами. В современных теплицах программируемое досвечивание посредством светодиодных ламп (LED) на радиоуправлении формирует адаптивные световые сценарии, но одновременно делает систему освещения чувствительной к цифровым эффектам управления, примером чего может служить ошибка квантования при цифровом задании коэффициента заполнения широтно-импульсной модуляции (ШИМ). Исследования по фотобиологии, как правило, касаются реакции растений на величину плотности фотосинтетического потока фотонов (Photosynthetic Photon Flux Density, PPFD), спектральный состав и режимы пульсирующего освещения, тогда как при анализе LED-драйверов рассматривается разрядность ШИМ преимущественно как параметры точности диммирования, энергоэффективности и электромагнитной совместимости. Следовательно, остаётся неопределённым, при каких сочетаниях PPFD и разрядности ШИМ дискретность цифрового управления может приводить к биологически значимой нестабильности фотосинтетического отклика. Цель данного исследования — разработать расчётный критерий оценки допустимой разрядности ШИМ-управления LED-досветкой, ограничивающий относительную вариацию чистой скорости фотосинтеза растений.

Материалы и методы. Авторами проведён обзор публикаций, касающихся управления с помощью широтно-импульсной модуляции светодиодной досветкой и пульсирующего освещения растений с использованием целевых запросов. На основе современных представлений о светокультуре в качестве основных метрик световой среды принята фотонная величина плотности фотосинтетического потока фотонов, отражающая количество полезного света, падающего на поверхность листьев за единицу времени. Фотосинтетическая активность моделировалась эмпирической зависимостью чистой скорости фотосинтеза от PPFD. Для оценки влияния шума квантования в канале ШИМ-управления LED-досветкой разработана двухэтапная математическая модель, описывающая преобразование параметров квантования в флуктуации PPFD и их дальнейшее воздействие на вариации фотосинтетического отклика, с введением критерия допустимого уровня нестабильности фотосинтеза и расчётных требований к разрядности, частоте модуляции и глубине пульсаций светового потока.

Результаты исследования. Показано, что чувствительность чистой скорости фотосинтеза томата к флуктуациям PPFD максимальна в промежуточном диапазоне 200–600 мкмоль·м⁻²·с⁻¹, соответствующем крутой части световой кривой, и резко снижается в области светового насыщения при PPFD выше ~1500 мкмоль·м⁻²·с⁻¹. На основе численного моделирования установлено, что 8-битное ШИМ-управление приводит в этом диапазоне к относительной вариации фотосинтеза на уровне нескольких процентов, тогда как при разрядности 12–16 бит временная не-

стабильность фотосинтетического отклика снижается до величин ниже 1–3 %. Полученные зависимости позволили сформулировать инженерные рекомендации по минимально допустимой разрядности и частоте ШИМ для различных рабочих диапазонов PPFD, обеспечивающим отсутствие биологически значимой нестабильности фотосинтеза, и увязать параметры цифровой системы управления LED-досветкой с требованиями к устойчивости урожайности тепличных культур.

Обсуждение. Полученные световые кривые и их аппроксимация гиперболическими моделями подтверждают классическую картину светового насыщения фотосинтеза: почти линейный рост при низком PPFD и выход на плато при высоких уровнях освещённости, что согласуется с общими подходами к оценке продуктивности по интегральным ресурсам. Применение производной световой кривой как меры чувствительности фотосинтеза к флуктуациям PPFD показало, что в диапазоне умеренных значений PPFD высокочастотные пульсации, обусловленные шумом квантования, могут вызывать дополнительную вариабельность фотосинтетического отклика в пределах нескольких процентов. Моделирование позволило установить, что переход от 8 к 12–16-битному ШИМ при килогерцевых частотах снижает эту несабильность до значений, сопоставимых с естественными колебаниями микроклимата и пространственной неравномерностью света, тем самым превращая цифровое управление освещением в значимый фотобиологический фактор. Предложенный критерий допустимой нестабильности фотосинтеза дополняет существующие рекомендации по PPFD формализованными ограничениями на пульсации освещённости и может использоваться при проектировании цифровых систем управления LED-досветкой в рамках концепций Agriculture 4.0 и CEA.

Заключение. Разработан расчётный критерий для выбора разрядности ШИМ-управления LED-досветкой, связывающий дискретность задания PPFD с допустимой относительной вариацией чистой скорости фотосинтеза растений. Расчёт для модельной световой кривой томата показал наибольшую чувствительность к ошибке квантования в диапазоне PPFD 200–600 мкмоль м⁻² с⁻¹, при световом насыщении её влияние снижается. Для принятого набора параметров 12-битное и более высокое разрешение ШИМ обеспечивало расчётную вариацию P_n не выше 1–2 %. Результаты применимы к стационарным условиям и требуют экспериментальной проверки на культурах с различными световыми кривыми, а также расширения на динамические режимы досветки.

Ключевые слова: цифровое управление освещением, фотосинтез тепличных культур, сельское хозяйство в контролируемой среде, LED-досветка растений, широтно-импульсная модуляция, стабильность фотосинтетического отклика, плотность фотосинтетического потока фотонов, Agriculture 4.0

Благодарности. Авторы выражают благодарность рецензентам и редакции журнала за ценные замечания и рекомендации, позволившие существенно повысить качество представленной работы.

Финансирование. Исследование выполнено на средства гранта Российского научного фонда № 26-16-20028 <https://rscf.ru/project/26-16-20028/> в рамках проекта, реализуемого по приоритетному направлению поддерживаемого регионом исследования «Разработка системы мониторинга и управления производственными процессами в тепличных комплексах на основе применения беспроводных сенсорных сетей повышенной надёжности».

Для цитирования. Самойленко В.В., Федоренко В.В. Расчётная оценка влияния разрядности ШИМ-управления LED-досветкой на фотосинтетический отклик растений. *Advanced Engineering Research (Rostov-on-Don)*. 2026;26(3):2660. <https://doi.org/10.23947/2687-1653-2026-26-3-2660>

Original Theoretical Research

Computational Assessment of the Effect of PWM Resolution in LED Supplementary Lighting on Plant Photosynthetic Response

Vladimir V. Samoylenko¹  , Vladimir V. Fedorenko²  

¹ Stavropol State Agrarian University, Stavropol, Russian Federation, <https://ror.org/02x91aj62>

² North-Caucasus Federal University, Stavropol, Russian Federation, <https://ror.org/05g1k4d79>

 samoylenko.vv@stgau.ru

Abstract

Introduction. Controlled-environment agriculture (CEA) is emerging as a key platform for Agriculture 4.0, where sensors, cyber-physical systems, and artificial intelligence enable precise control over light regimes and resources. In modern greenhouses, programmable supplementary lighting using radio-controlled LED creates adaptive light scenarios, yet simultaneously renders the light system sensitive to digital control effects. Quantization error in the digital setting of the pulse-width modulation (PWM) duty cycle serves as an example of this. Photobiological studies typically focus on plant responses to photosynthetic photon flux density (PPFD), spectral composition, and pulsed light regimes, whereas

analyses of LED drivers treat PWM bit depth primarily in terms of dimming accuracy, energy efficiency, and electromagnetic compatibility. Consequently, it remains unclear at which combinations of PPFD and PWM bit depth the discreteness of digital control might lead to biologically significant instability in the photosynthetic response. The objective of this study is to develop a computational criterion for evaluating the permissible bit depth of PWM control for LED supplementary lighting, limiting the relative variation in the net photosynthetic rate of plants.

Materials and Methods. The authors reviewed publications on PWM-based control of LED supplementary lighting and pulsed plant lighting using targeted queries. Based on current concepts in controlled environment lighting, PPFD — the amount of useful light incident on the leaf surface per unit time — was adopted as the primary metric of the light environment. Photosynthetic activity was simulated using an empirical relationship between the net photosynthesis rate and PPFD. To assess the impact of quantization noise in the PWM control channel of the LED supplementary light system, a two-stage mathematical model has been developed. It describes how quantization parameters are converted into PPFD fluctuations, and how these, in turn, affect variations in the photosynthetic response. It also introduces a criterion for the acceptable level of photosynthesis instability along with computed requirements for bit depth, modulation frequency, and light flux pulsation depth.

Results. It has been shown that the sensitivity of the net photosynthetic rate of tomato plants to PPFD fluctuations is maximal in the intermediate range of 200–600 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\text{ s}^{-1}$, corresponding to the steep section of the light-response curve, and decreases sharply in the light-saturation region at PPFD levels above $\sim 1500\text{ }\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\text{ s}^{-1}$. Numerical modeling indicates that 8-bit PWM control results in a relative variation in photosynthesis of a few percent within this range, whereas using 12- to 16-bit resolution reduces the temporal instability of the photosynthetic response to levels below 1–3%. The derived relationships made it possible to formulate engineering recommendations regarding the minimum permissible PWM bit depth and frequency for various PPFD operating ranges — providing the absence of biologically significant instability in photosynthesis — and to link the parameters of the digital LED supplementary light control system with requirements for crop yield stability in greenhouses.

Discussion. The obtained light curves and their approximation using hyperbolic models confirm the classic pattern of photosynthetic light saturation: a nearly linear increase at low PPFD and a plateau at high light levels, consistent with general approaches to assessing productivity based on integrated resources. Using the derivative of the light curve as a measure of photosynthetic sensitivity to PPFD fluctuations have revealed that, within the moderate PPFD range, high-frequency pulsations caused by quantization noise can induce additional variability in the photosynthetic response of a few percent. Simulation has shown that transitioning from 8-bit to 12–16-bit PWM at kilohertz frequencies reduces this instability to levels comparable to natural microclimate fluctuations and spatial light non-uniformity, thereby transforming digital light control into a significant photobiological factor. The proposed criterion for permissible photosynthetic instability complements existing PPFD recommendations with formalized constraints on light pulsation and can be used in the design of digital control systems for LED supplementary lighting within the frameworks of Agriculture 4.0 and CEA.

Conclusion. A calculation criterion has been developed for selecting the bit depth of PWM control for LED supplementary lighting. This criterion links the granularity of the PPFD setpoint to the permissible relative variation in the net photosynthetic rate of plants. Calculations based on a model light-response curve for tomato plants revealed the highest sensitivity to quantization error within the PPFD range of 200–600 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\text{ s}^{-1}$, whereas the impact of this error diminishes under light saturation conditions. For the selected set of parameters, a PWM resolution of 12 bits or higher ensured a calculated variation in P_n of no more than 1–2%. The results are applicable to steady-state conditions and require experimental validation using cultures with different light-response curves, as well as extension to dynamic supplementary light regimes.

Keywords: digital light control, greenhouse crop photosynthesis, controlled-environment agriculture, LED supplementary lighting, pulse-width modulation, stability of photosynthetic response, photosynthetic photon flux density, Agriculture 4.0

Acknowledgements. The authors would like to thank the reviewers and the Editorial board for their valuable comments and recommendations that helped to improve the quality of the submitted paper.

Funding Information. The research was supported by the Russian Science Foundation (Grant No. 26-16-20028), <https://rscf.ru/project/26-16-20028/>, within the framework of the project implemented under the region-supported priority research area: “Development of a monitoring and control system for production processes in greenhouse complexes based on the use of high-reliability wireless sensor networks.”

For Citation. Samoylenko VV, Fedorenko VV. Computational Assessment of the Effect of PWM Resolution in LED Supplementary Lighting on Plant Photosynthetic Response. *Advanced Engineering Research (Rostov-on-Don)*. 2026;26(3):2660. <https://doi.org/10.23947/2687-1653-2026-26-3-2660>

Введение. Сельское хозяйство в контролируемой среде (Controlled-environment agriculture, CEA) рассматривается как одна из ключевых платформ реализации концепции Agriculture 4.0, в которой цифровизация, интернет вещей, киберфизические системы и аналитика данных интегрируются в единую высокоавтоматизированную производственную среду [1]. Комплекс мероприятий по обеспечению продовольственной безопасности Российской Федерации также подталкивает индустрию к активной цифровизации и повышению эффективности производства [2]. Технология CEA заключается в широком внедрении сетей беспроводных датчиков [3], интеллектуальных систем управления климатом и питанием, компьютерного зрения и цифровых двойников теплиц и вертикальных ферм, что позволяет в режиме реального времени адаптировать условия выращивания под требования конкретных культур и целевых показателей качества продукции [4]. В такой архитектуре концепции Agriculture 4.0 подсистема управления освещением превращается из рядового элемента системы автоматизации в один из основных киберфизических модулей, тесно связанных с облачной аналитикой, системами поддержки принятия решений и алгоритмами искусственного интеллекта [5].

Светодиодная досветка стала одним из наиболее энергоёмких и управляемых элементов современных тепличных комплексов: её доля в энергопотреблении сооружения защищённого грунта может достигать 60–85 % и 20–40 % — в себестоимости продукции [6]. Одновременно переход от локального ручного регулирования к программируемым светильникам, распределённым контроллерам, беспроводным сетям датчиков и алгоритмам динамического управления увеличивает число уровней цифрового преобразования сигнала между заданием светового режима и фактическим фотонным потоком в зоне листьев. Поэтому точность задания PPFD становится не только электротехнической характеристикой диммирования, но и параметром качества управляющего воздействия на растение.

При ШИМ-регулировании конечная разрядность контроллера задаёт минимальный шаг коэффициента заполнения $\Delta D = 1/(2^N - 1)$. При линейной зависимости среднего светового потока от коэффициента заполнения это соответствует шагу задания $\Delta PPFD = PPFD_{max}/(2^N - 1)$. Например, при доступном диапазоне 0–1000 мкмоль·м⁻²·с⁻¹ один код 8-битного управления соответствует приблизительно 3,9 мкмоль·м⁻²·с⁻¹, тогда как 12-битного управления — около 0,24 мкмоль·м⁻²·с⁻¹. В многоканальных системах, где световой поток корректируется по данным датчиков и меняется в течение фотопериода, такая дискретность может стать значимой в диапазонах PPFD с высокой чувствительностью фотосинтетического отклика [7]. Следовательно, актуальность проблемы обусловлена не появлением нового физического эффекта, а расширением применения цифрового, сетевого и адаптивного управления LED-досветкой, при котором точность формирования световой уставки становится частью качественного функционирования всей системы.

С точки зрения биологии явление прерывистого освещения было подробно исследовано ещё в 1950–1960 годах. Импульсная подсветка в десятки — сотни Гц при определённых скважностях даёт фотохимическую эффективность, сопоставимую с непрерывным освещением или превышающую его, при экономии энергии до 67 % [8]. В работе [9] показано, что чистая скорость фотосинтеза (Net Photosynthetic Rate, P_n) салата под воздействием пульсирующего облучения зависит от взаимодействия плотности фотосинтетического потока фотонов, частоты и коэффициента заполнения импульсов света. Сопоставимая средняя освещённость не гарантирует одинакового фотосинтетического отклика при различной временной структуре светового сигнала. Однако в этой работе рассматривались преднамеренно заданные режимы импульсного облучения и не анализировались такие параметры, как дискретность цифрового задания коэффициента заполнения, ошибка квантования и точность воспроизведения установленного среднего PPFD.

Другие исследования, в частности [10], также демонстрируют неоднозначность реакции растений на пульсирующее освещение. У салата при низких частотах и малой скважности фотосинтетическая активность может снижаться, по сравнению с непрерывным светом, тогда как при высоких частотах и соответствующем коэффициенте заполнения различия могут быть минимальными или сопровождаться улучшением отдельных показателей роста и энергоиспользования. В экспериментах с различной формой светового импульса при среднем PPFD 100 мкмоль·м⁻²·с⁻¹, описанных в [11], установлено, что чистая скорость фотосинтеза салата при полноволновом выпрямленном сигнале 50 Гц превышала показатель для прямоугольных импульсов 100 Гц с коэффициентом заполнения 50 % и не отличалась статистически от непрерывного освещения. Это указывает на то, что биологически значимыми могут быть не только частота и средний PPFD, но и форма сигнала.

Инженерные исследования ШИМ-драйверов для растениеводческого освещения сосредоточены преимущественно на диапазоне диммирования, КПД, быстродействии переходных процессов, пульсациях тока, тепловом режиме, электромагнитной совместимости и цветовых характеристиках излучения. Например, в работе [12] по ШИМ-драйверам для LED оцениваются точность регулирования тока и стабильность цветовых координат, при коэффициенте пульсаций тока до 30 % фотометрические характеристики LED могут оставаться близкими

к постоянным. При этом спектральные эффекты обычно не рассматриваются в качестве фотобиологического фактора, поскольку инженерная цель таких работ заключается в обеспечении электрических и светотехнических характеристик источника, а не в оценке реакции растения. Следовательно, результаты таких исследований не могут быть напрямую использованы для установления допустимой разрядности ШИМ с позиции обеспечения стабильности фотосинтеза.

Таким образом, можно констатировать, что вышеуказанные публикации формируют два взаимодополняющих, но слабо связанных друг с другом направления исследования: фотобиологическое и инженерное. При фотобиологическом изучается ответ растений на специально сформированные режимы пульсирующего освещения, но, как правило, при этом не выделяется ошибка квантования цифрового задания среднего PPFD. В инженерных изысканиях анализируются характеристики ШИМ-драйверов и цифрового диммирования, но ошибка задания светового потока не переводится в показатели фотосинтетического отклика. Из этого следует вывод, что не существует количественной модели, которая связывала бы разрядность ШИМ-управления с ошибкой задания среднего PPFD и далее — с относительной вариацией чистой скорости фотосинтеза в заданной рабочей точке световой кривой.

Цель данного исследования — разработать и апробировать на модельной световой кривой томата расчётный критерий выбора разрядности цифровой системы ШИМ-управления LED-досветкой, устанавливающий количественную связь между шагом квантования коэффициента заполнения, погрешностью воспроизведения среднего уровня PPFD и относительным отклонением чистой скорости фотосинтеза P_n . Такой критерий предназначен для оценки минимальной разрядности цифрового контроллера, при которой ошибка дискретного задания PPFD в заданной рабочей точке световой кривой не приводит к превышению установленного порога относительной вариации P_n . Исследование ограничено стационарными режимами досветки при постоянных температуре, концентрации CO₂, влажности, водном и минеральном статусе растений. Пульсации тока внутри периода ШИМ, джиттер, ошибки беспроводной связи, спектральные сдвиги LED и пространственная неоднородность светового поля в расчётной модели не учитываются.

Материалы и методы. *Анализ литературных источников.* Исследование основано на проведенном обзоре публикаций по тематике научных исследований в IEEE Xplore, ScienceDirect, MDPI, Frontiers и SpringerLink. Использовались комбинации запросов: PWM dimming horticulture LED, pulsed light photosynthesis, LED driver quantization noise, flashing light effect microalgae, duty cycle PPFD lettuce, PWM AlGaInP spectral shift, conducted EMI LED PWM dimming. Анализировались публикации 2015–2026 годов.

На первом этапе было выявлено более 300 публикаций на заданную тему. После удаления дубликатов осталось 258. По названиям и аннотациям исключено 208, не относящихся к искусственному освещению растений, LED-системам или фотосинтетическому отклику. Полные тексты 50 научных работ оценивались на соответствие критериям отбора. Таким образом, в аналитический обзор было включено 22 источника, которые содержали в себе следующие параметры:

- количественные характеристики светового воздействия на растения, такие как PPFD, спектральный состав, частота, коэффициент заполнения, форма импульса или пульсации светового потока;
- данные о фотосинтезе, газообмене, флуоресценции хлорофилла, росте либо продуктивности растений при непрерывном или модулированном LED-освещении;
- характеристики цифрового управления LED-светильниками и драйверами, включая ШИМ, разрядность, точность диммирования, пульсации тока, быстродействие и электромагнитную совместимость;
- методы расчёта, измерения или управления PPFD и DLI в тепличных, фитотронных либо вертикальных фермерских системах.

Прямых публикаций, в которых бы количественно оценивалась последовательность «разрядность ШИМ → погрешность воспроизведения среднего PPFD → вариабельность чистой скорости фотосинтеза», в отобранной выборке не было выявлено, поэтому обоснование модели построено на сопоставлении результатов этих трех составляющих.

Методика оценки фотосинтетической активности. Для оценки влияния шума квантования на фотосинтез растений важным аспектом является определение целевых параметров осветительных установок и фотосинтетических параметров. Действующий ГОСТ Р 58461-2019¹ вводит специализированные единицы измерения для растений. Анализ литературных источников, в частности [13], показал, что основными единицами для измерения светового потока, воздействующего на растения в теплицах, являются фотонные единицы PPFD и суточный интеграл света (Daily Light Integral, DLI), поскольку именно они непосредственно связаны с квантовой природой фотосинтеза. Радиометрические величины необходимы для анализа энергетического и теплового режима, а фотометрические величины имеют вспомогательное значение и не должны использоваться в качестве основы для нормирования режимов светокультуры без перехода к фотонным метрикам.

¹ ГОСТ Р 58461-2019 *Освещение растений в сооружениях защищенного грунта. Термины и определения.* URL: <https://files.stroyinf.ru/Data/715/71513.pdf> (дата обращения: 01.07.2026).

Параметр DLI, определяемый как интеграл PPFD в течение суток [14], характеризует суточную дозу света, поглощаемого растениями, и используется для описания как естественного климатического режима, так и суммарного эффекта естественного и искусственного освещения. С учетом необходимости оценки мгновенных значений данный параметр не рассматривается в данной работе.

Для проведения исследования была использована эмпирическая зависимость PPFD и P_n [15]:

$$P_n = P_{n_{\max}} \cdot \left(1 - \exp \left(-k \cdot \frac{PPFD}{PPFD_{\text{sat}}} \right) \right), k = d \cdot 2,3026, \quad (1)$$

где $P_{n_{\max}}$ — максимальная скорость фотосинтеза (задаётся пользователем); $PPFD_{\text{sat}}$ — точка светового насыщения (значение PPFD, при котором интенсивность фотосинтеза достигает $\approx 90\%$ от $P_{n_{\max}}$, если $d = 1$); d — коэффициент потемнения (в диапазоне 0,1–0,3), он влияет на крутизну начального участка кривой: чем меньше d , тем медленнее растёт P_n с увеличением освещённости.

P_n , в свою очередь, оказывает влияние на рост растения, что отражает упрощённая модель дневного прироста сухой массы растения [16]:

$$\Delta W = \int_0^T (P_n \cdot S_L - R) dt,$$

где ΔW — прирост сухой массы за время T ; S_L — суммарная фотосинтезирующая площадь листьев; R — расход углерода на дыхание и другие потери (в углеродных единицах).

В настоящей работе в качестве базового объекта параметризации использован томат как одна из наиболее изученных тепличных культур, для которой в литературе представлены количественные зависимости $P_n(PPFD)$ в условиях СЕА. При этом следует отметить, что форма световой кривой, положение области светового насыщения и величина локальной чувствительности $dP_n/dPPFD$ зависят от биологических особенностей культуры, сортотипа, фазы онтогенеза и текущего физиологического состояния растений. Вследствие этого полученные далее количественные оценки следует интерпретировать как результаты для модельного объекта «томат», тогда как предложенный подход в целом сохраняет применимость и для других культур при замене параметров функции $P_n(PPFD)$ на видоспецифические и фазоспецифические.

Математическое моделирование влияния квантования ШИМ-управления LED-досветкой на фотосинтетический отклик растений. Для задания реалистичных граничных условий и проверочных диапазонов параметров при моделировании был применен анализ технологических характеристик системы светодиодного освещения тепличного комплекса «Солнечный дар», расположенного в Ставропольском крае Российской Федерации (45.295220, 41.468056). На площади порядка 20 га в данном комплексе используется система LED-досветки на базе светодиодных облучателей YAR-2-1040W-78R9G5B+8FR (GOLDEN SCORPION (AH) CO., LTD, KHP) и CS-1000-900100 (Nanolux, KHP).

Первый тип светильников формирует основной фотосинтетически активный поток ($\sim 3200 \text{ мкмоль} \cdot \text{с}^{-1}$) с преобладанием красного и дальнего красного излучения, тогда как второй тип используется для спектральной коррекции и настройки «светового рецепта» под разные фазы онтогенеза томата. Управление группами светильников осуществляется по беспроводному каналу связи (рис. 1), а регулирование светового потока проводится посредством ШИМ-сигнала от управляющего микропроцессора. При этом экспериментальные исследования непосредственно на данном комплексе в рамках работы не проводились, а его параметры использовались исключительно как типичный пример промышленной СЕА-системы и источник реалистичных диапазонов PPFD, разрядности и частот ШИМ для верификации и настройки предложенной модели.

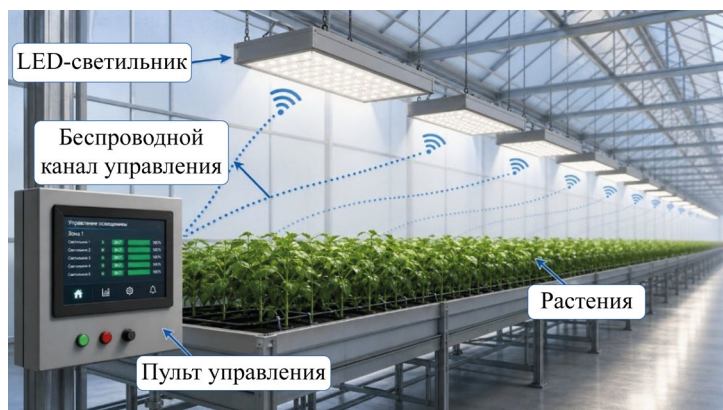


Рис. 1. Беспроводная система управления LED-досветкой в тепличном комплексе (изображение сгенерировано с использованием ИИ-инструмента Perplexity генеративной моделью GPT-4o)

Установленная зависимость чистой скорости фотосинтеза (P_n) от плотности фотосинтетического потока фотонов (PPFD) позволяет рассматривать световой режим как ключевое управляющее воздействие в тепличных системах с искусственным освещением. Однако в реальных цифровых системах LED-досветки задаваемый уровень PPFD формируется не непрерывно, а дискретно через ШИМ-сигналы, конечную разрядность контроллера и тактирование драйверов. Вследствие этого фактический световой поток может содержать малые амплитудные и временные отклонения от заданного значения, обусловленные шумом квантования. В этой связи на основе математического выражения световой кривой фотосинтеза $P_n = f(PPFD)$ было рассмотрено, каким образом параметры квантования в канале управления преобразуются в флуктуации PPFD.

Для количественной оценки влияния шума квантования в канале управления LED-досветкой на фотосинтетический отклик была использована двухэтапная модель: преобразование параметров квантования в флуктуации PPFD и связь флуктуаций PPFD с вариацией чистой скорости фотосинтеза P_n . В качестве базовой зависимости светового отклика была принята прямоугольная гипербола [17]:

$$P_n(PPFD) = \frac{P_{\max} \alpha PPFD}{P_{\max} + \alpha PPFD}, \quad (2)$$

где $P_{\max}$ — скорость фотосинтеза при световом насыщении; α — квантовый выход при низких значениях PPFD.

При этом в рассматриваемой постановке остальные факторы среды, такие как температура листа и воздуха, концентрация CO_2 , влажность воздуха, водообеспеченность и минеральное питание принимались условно постоянными, что позволило изолированно оценить вклад именно флуктуаций PPFD, индуцированных параметрами цифрового управления. Такое допущение оправдано для теоретического анализа чувствительности системы, однако не охватывает всей полноты реальных процессов в СЕА-системах, где фотосинтетический отклик формируется как результат совместного действия световых и несветовых факторов.

Если идеальное (заданное контроллером) значение PPFD в зоне листьев обозначить как $PPFD_0$, тогда фактическая освещённость с учётом квантования и дискретности ШИМ-управления будет описана выражением:

$$PPFD(t) = PPFD_0 + \delta PPFD_q(t), \quad (3)$$

где $\delta PPFD_q(t)$ моделирует флуктуации светового потока, обусловленные шумом квантования по уровню и по времени. Предполагается, что $\delta PPFD_q(t)$ является стационарным случайным процессом с нулевым средним и дисперсией σ_{PPFD}^2 , величина которой определяется шагом квантования, разрядностью ШИМ и частотой переключения драйвера.

Если выражение (3) подставить в (2) и линеаризовать зависимость $P_n = f(PPFD)$ по малым $\delta PPFD_q(t)$, будет получено приближение:

$$P_n(t) \approx P_n(PPFD_0) + \frac{dP_n}{dPPFD} \Big|_{PPFD_0} \delta PPFD_q(t). \quad (4)$$

Из (4) следует, что при $\mathbb{E}[\delta PPFD_q] = 0$ среднее значение фотосинтеза остаётся равным $P_n(PPFD_0)$, а дисперсия фотосинтетического отклика определяется выражением:

$$\text{Var}[P_n] \approx \left(\frac{dP_n}{dPPFD} \Big|_{PPFD_0} \right)^2 \sigma_{PPFD}^2. \quad (5)$$

Таким образом, чувствительность системы к шуму квантования задаётся произведением локального наклона кривой светового отклика $\frac{dP_n}{dPPFD} \Big|_{PPFD_0}$ и дисперсии σ_{PPFD}^2 , индуцированной параметрами квантования в канале управления LED-досветкой.

Для практического применения вводится критерий допустимого уровня нестабильности фотосинтеза в виде ограничения относительного стандартного отклонения:

$$\frac{\sqrt{\text{Var}[P_n]}}{P_n(PPFD_0)} \leq \varepsilon, \quad (6)$$

где ε — допустимая относительная вариация (например, 0,01–0,05). Если подставить (5) в (6), будет получено требование к σ_{PPFD} и, следовательно, к разрядности ШИМ/ЦАП и параметрам фильтрации светового сигнала:

$$\sigma_{PPFD} \leq \varepsilon \frac{P_n(PPFD_0)}{\left| \frac{dP_n}{dPPFD} \Big|_{PPFD_0} \right|}. \quad (7)$$

Соотношение (7) будет использовано в дальнейшем для расчётной оценки минимально допустимой разрядности, частоты модуляции и глубины пульсаций PPFD, при которых шум квантования не приводит к биологически значимой нестабильности P_n при выращивании растений в теплицах с искусственным освещением.

В более общем случае используемая в работе зависимость может быть расширена до многофакторной формы, в которой чистая скорость фотосинтеза рассматривается как функция не только PPFD, но и параметров микроклимата и ресурсного обеспечения растений: $P_n = f(PPFD, T, C_{CO_2}, VPD, W, N)$, где T — температура; C_{CO_2} — концентрация углекислого газа; VPD — дефицит давления водяного пара; W — показатель водного статуса; N — обеспеченность минеральным питанием.

В такой постановке чувствительность фотосинтетического отклика к шуму квантования определяется уже не только положением рабочей точки на световой кривой, но и текущим физиологическим и микроклиматическим контекстом.

Результаты исследования. На графике (рис. 2) представлена типичная световая кривая: быстрый рост P_n при PPFD до $\sim 500\text{--}600\text{ мкмоль}\cdot\text{м}^{-2}\cdot\text{с}^{-1}$ и постепенный выход на плато при $1500\text{--}2000\text{ мкмоль}\cdot\text{м}^{-2}\cdot\text{с}^{-1}$ (для всех трёх режимов (W300/W500/W700)). В терминах модели это означает:

- в области до $\sim 500\text{ мкмоль}\cdot\text{м}^{-2}\cdot\text{с}^{-1}$ модуль производной $dP_n/dPPFD$ максимален, поэтому даже небольшие флуктуации PPFD, вызванные шумом квантования, дают заметную вариацию P_n ;
- в области $1500\text{--}2000\text{ мкмоль}\cdot\text{м}^{-2}\cdot\text{с}^{-1}$ кривая близка к насыщению, $dP_n/dPPFD$ мал, и та же σ_{PPFD} почти не влияет на P_n .

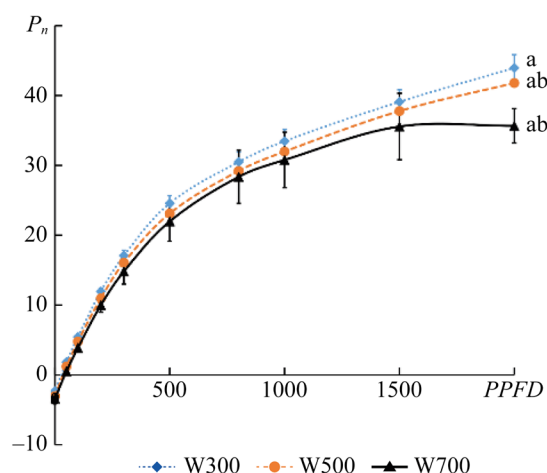


Рис. 2. Зависимость световой реакции чистой скорости фотосинтеза от PPFD при выращивании томатов [15]

На рис. 3 показана обработанная версия графика на рис. 2, отображающая зависимость чистой скорости фотосинтеза (P_n) от плотности фотосинтетического потока фотонов (PPFD) для трёх режимов освещения (W300, W500, W700), моделирующих различные уровни суммарной освещённости в тепличных условиях.

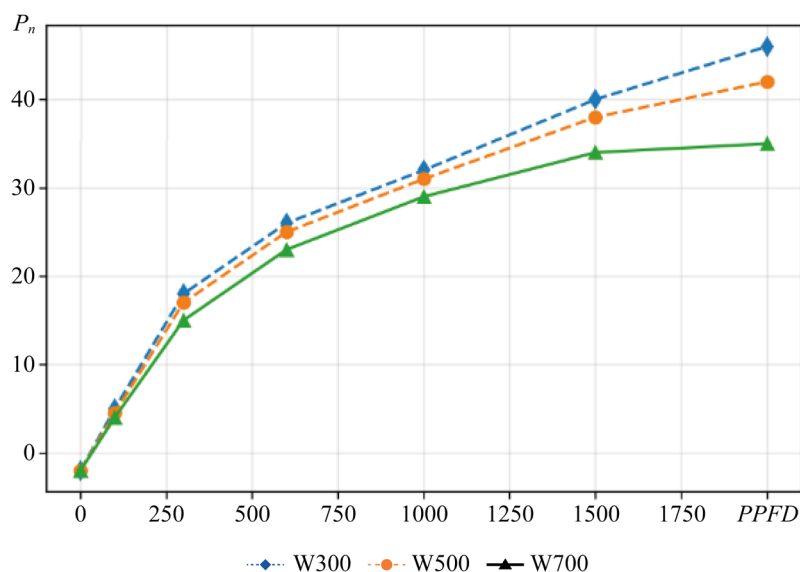


Рис. 3. Зависимость чистой скорости фотосинтеза P_n от плотности фотосинтетического потока фотонов для трёх режимов освещения (W300, W500, W700)

График на рис. 4 отражает чувствительность фотосинтеза к флуктуации PPFD с иллюстрацией численно рассчитанной производной $dP_n/dPPFD$ для аппроксимированной световой кривой на рис. 2. Максимальные значения $dP_n/dPPFD$ приходятся на промежуточный диапазон PPFD (200–600 мкмоль·м⁻²·с⁻¹), тогда как в области светового насыщения ($PPFD \geq 150$ мкмоль·м⁻²·с⁻¹) производная стремится к нулю. Данный факт указывает на резкое снижение влияния флуктуаций светового потока на фотосинтетический отклик. Представленная зависимость используется для количественной оценки влияния шума квантования через модель $Var[P_n] \approx (dP_n/dPPFD)^2 \sigma_{PPFD}^2$.

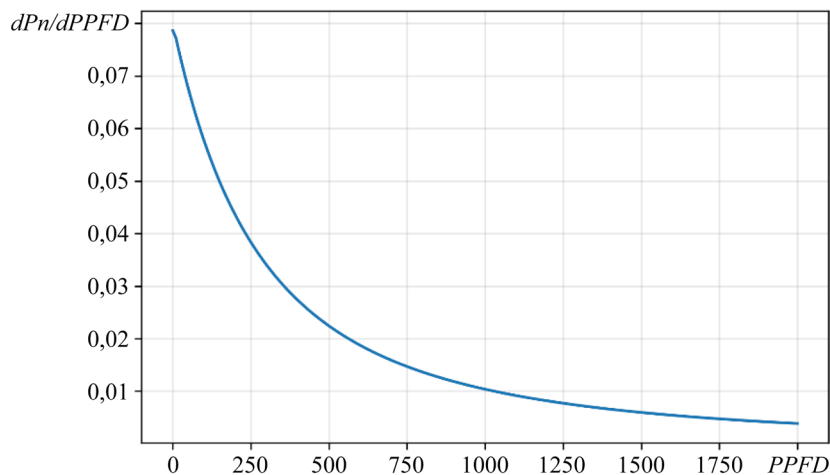


Рис. 4. График чувствительности фотосинтеза к PPFD

На рис. 5 представлена зависимость относительного стандартного отклонения PPFD ($\sigma_{PPFD}/PPFD_0$) от разрядности ШИМ-управления для нескольких частот модуляции (1, 5 и 20 кГц). Данные на графике служат связующим звеном между параметрами цифровой системы управления и вариабельностью светового режима.

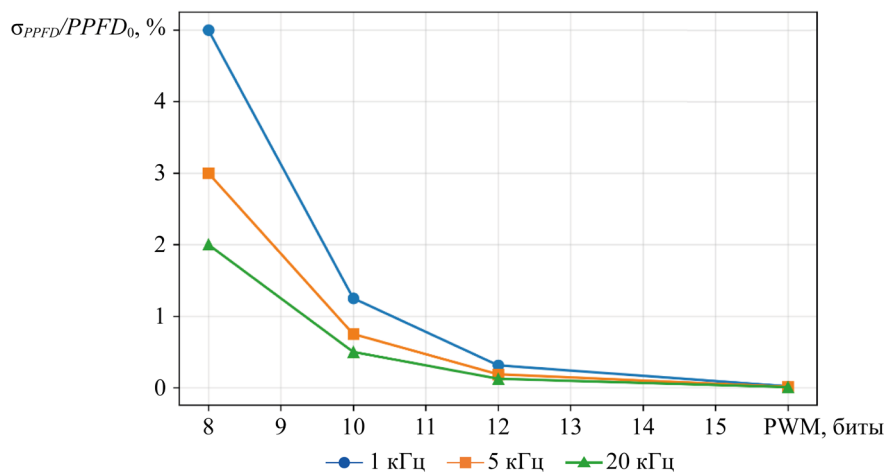


Рис. 5. Зависимость относительного стандартного отклонения освещённости $\sigma_{PPFD}/PPFD_0$ от разрядности ШИМ и частоты модуляции (1, 5 и 20 кГц)

На рис. 6 продемонстрированы результаты, полученные на основе предложенной математической модели (7). Зависимость отражает относительное стандартное отклонение чистой скорости фотосинтеза $\sqrt{Var[P_n]}/P_n$ от заданного уровня PPFD₀ для четырёх вариантов разрядности ШИМ (8, 10, 12 и 16 бит). Показано, что при 8-битном квантовании в диапазоне средних PPFD (300–600 мкмоль·м⁻²·с⁻¹), соответствующем крутой части световой кривой, относительная вариация P_n достигает нескольких процентов и превышает условный порог $\varepsilon = 2\%$, тогда как при разрядности 12–16 бит во всём рабочем диапазоне она остаётся ниже этого порога. В области светового насыщения влияние шума квантования на P_n минимально для всех разрядностей, что подчёркивает совместное значение выбора рабочего диапазона PPFD и параметров квантования.

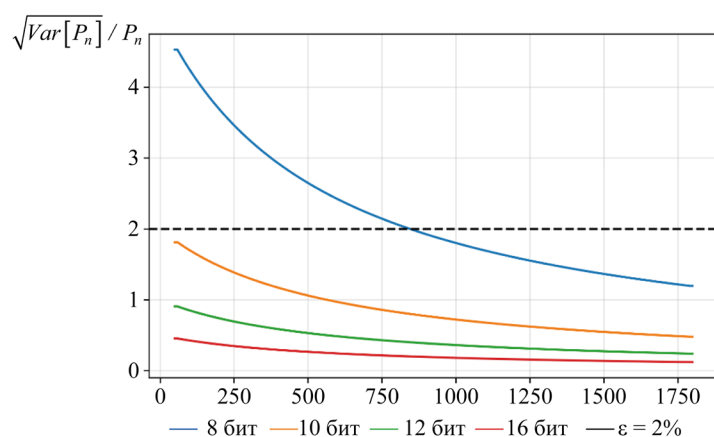


Рис. 6. Графическая визуализация полученной математической модели (7) для различных вариантов разрядностей ШИМ

На рис. 7 а представлены временные реализации PPFD(t) при 8 и 12-битном ШИМ-управлении при одинаковом среднем значении PPFD₀. Зависимости иллюстрируют более крупные и нерегулярные флуктуации освещённости при низкой разрядности. На рис. 7 б показаны соответствующие временные ряды фотосинтетического отклика $P_n(t)$, полученные путём подстановки PPFD(t) в модель световой кривой.

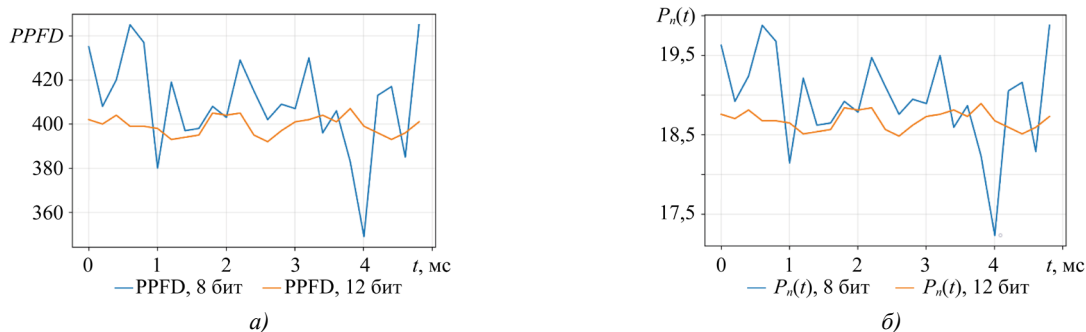


Рис. 7. Временные реализации PPFD(t), $P_n(t)$; а — временные реализации PPFD(t) при 8 и 12-битном ШИМ-управлении при одинаковом среднем уровне PPFD₀; б — временные реализации фотосинтетического отклика $P_n(t)$, полученные по модельной зависимости $P_n = f(PPFD)$ для 8 и 12-битного квантования

С учётом результатов моделирования и известных требований к качеству освещения в тепличных комплексах были сформулированы инженерные рекомендации по параметрам цифрового управления LED-досветкой для различных рабочих диапазонов PPFD (таблица 1). Параметры связывают диапазон целевых значений PPFD₀, характерный для конкретных культур и режимов выращивания, с минимально необходимой разрядностью и частотой ШИМ. Эти характеристики обеспечивают относительное стандартное отклонение чистой скорости фотосинтеза от шума квантования на уровне не выше 1–3 %. При проектировании конкретных систем эти значения могут уточняться с учётом спектральных характеристик светильников, особенностей драйверов и агротехнических требований.

Таблица 1

Рекомендуемые параметры цифрового управления LED-досветкой для различных диапазонов PPFD₀ с учётом влияния шума квантования на фотосинтез

Рабочий диапазон PPFD ₀ , мкмоль м ⁻² с ⁻¹	Тепличная культура, фаза, режим	Минимальная разрядность ШИМ	Рекомендуемая частота ШИМ, кГц	Ожидаемая вариация P_n от шума квантования*
200–300	Зелёные культуры, рассада, умеренное досвечивание	12 бит	≥ 2	≤ 2–3 % при соблюдении критерия ε
300–500	Салаты, огурец, томат в интенсивных режимах	12–14 бит	≥ 2–4	≈ 1–2 %, сопоставимо с вариацией микроклимата
500–800	Светолюбивые культуры на границе насыщения	≥ 10–12 бит	≥ 1–2	< 2 % для большей части диапазона

Примечание: * При условии корректно спроектированного драйвера, ограниченных пульсаций тока и отсутствии низкочастотных провалов освещённости.

Обсуждение. Диапазон PPFD от 200 до 600 $\mu\text{моль} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$ является критической зоной чувствительности к шуму квантования, а далее влияние флуктуаций PPFD на P_n резко ослабевает. На основании данных из источника [18] можно сделать вывод, что для различных этапов вегетации данный параметр составляет от 200 до 850 $\mu\text{моль} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$, в связи с чем наблюдается существенное влияние флуктуаций PPFD на эффективность фотосинтеза и, соответственно, урожайность культуры [13, 19].

Данные графика на рис. 6 показывают, что увеличение разрядности приводит к экспоненциальному снижению относительного уровня шумовых флуктуаций PPFD, а рост частоты ШИМ дополнительно уменьшает эффективное влияние квантования за счёт переноса части спектра шума в высокочастотную область, менее значимую для фотосинтетического аппарата растений. Полученные световые кривые $P_n(\text{PPFD})$, представленные на рис. 6, и их аппроксимация гиперболическими моделями хорошо согласуются с общими представлениями о световом насыщении фотосинтеза [15], когда при возрастающем PPFD наблюдается квазилинейный рост скорости фотосинтеза, а при наступлении насыщения и дальнейшем увеличении освещённости происходит выход на плато. Такой характер зависимости лежит в основе подходов к количественной оценке продуктивности растений по интегральным ресурсам (вода, CO_2 , свет) и подтверждён для широкого ряда культур. В этом контексте использование производной $dP_n/d\text{PPFD}$ как меры чувствительности фотосинтеза к флуктуациям PPFD является естественным развитием принятых в физиологии растений подходов к анализу световых кривых [20].

Вместе с тем следует учитывать, что использованная в работе параметризация по томату не исчерпывает биологическую вариабельность культур, выращиваемых в сооружениях защищённого грунта. У разных видов и сортов растений положение светового насыщения, квантовый выход, крутизна начального участка световой кривой и скорость перехода к плато могут существенно различаться, что приводит к различной чувствительности фотосинтетического аппарата к одинаковым по амплитуде флуктуациям PPFD. Кроме того, даже в пределах одной культуры чувствительность к световым возмущениям меняется по фазам онтогенеза от вегетативного роста до цветения и плодоношения, а также зависит от физиологического состояния растения, включая стресс от воды, температуры или элементов питания. Следовательно, при практическом использовании предложенного подхода инженерные требования к разрядности и частоте ШИМ целесообразно уточнять на основе $P_n(\text{PPFD})$ -характеристик, определенных для конкретной культуры, сорта и стадии развития.

На основании полученных в исследовании данных (рис. 7 а, б) можно сделать вывод о том, что нелинейный характер зависимости $P_n = f(\text{PPFD})$ частично сглаживает высокочастотные колебания, однако при 8-битном квантовании остаются заметные пульсации P_n , в то время как при 12-битном уровне они практически исчезают. Эти результаты подтверждают, что повышение разрядности ШИМ и уменьшение флуктуаций PPFD приводят к снижению временной нестабильности фотосинтеза.

С другой стороны, в исследованиях по фенотипированию растений и анализу зависимостей «ресурсы $\rightarrow$ рост» [21] подчеркивается, что даже при одинаковых интегральных ресурсах (например, одинаковой суммарной дозе света) различия в динамике подачи могут приводить к различиям в накоплении биомассы и функциональных показателях. В диапазоне умеренных PPFD, где $dP_n/d\text{PPFD}$ максимально, высокочастотные флуктуации PPFD, обусловленные шумом квантования в цифровых системах управления, могут давать добавочную вариацию P_n на уровне процентов. Предложенный в настоящей работе критерий $\sqrt{\text{Var}[P_n]}/P_n \leq \epsilon$ фактически дополняет используемые в СЕА и тепличной практике рекомендации по целевым PPFD и DLI формальным ограничением на допустимый уровень пульсаций освещённости, связанных с параметрами квантования [20].

Существенным ограничением настоящей модели является также однофакторное описание внешней среды через PPFD. В реальных СЕА-системах чистая скорость фотосинтеза определяется совместными параметрами освещённости, температуры, концентрации CO_2 , влажностного режима, обеспеченности водой и минеральным питанием, причём перечисленные факторы способны изменять как абсолютный уровень P_n , так и локальную производную $dP_n/d\text{PPFD}$, лежащую в основе предложенного критерия чувствительности. Поэтому при одинаковом среднем значении PPFD одна и та же глубина квантовых флуктуаций может приводить к различным по величине биологическим эффектам в зависимости от микроклимата и состояния растения. С этой точки зрения дальнейшее развитие модели целесообразно связывать с переходом от однофакторной зависимости $P_n = f(\text{PPFD})$ к многофакторным функциям отклика, учитывающим ключевые параметры среды и их взаимное влияние.

Работы по цифровому управлению LED-освещением и драйверам [12], как правило, сосредоточены на вопросах эффективности преобразования, термостабильности и электромагнитной совместимости, при этом высокие разрядности ШИМ и частоты модуляции используются в основном для обеспечения диммирования и исключения видимого мерцания. В таких исследованиях влияние разрядности и частоты ШИМ на биологические показатели выращиваемых культур почти не рассматривается. Результаты настоящего моделирования показывают, что при PPFD порядка 300–500 $\mu\text{моль} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$ переход от 8-битного к 12–16-битному ШИМ при частотах $\geq 2\text{--}4$ кГц способен

снизить модельную вариабельность P_n , обусловленную шумом квантования, с нескольких процентов до величин $<1-2\%$, то есть до уровня, сравнимого с неоднородностями микроклимата и пространственного распределения света. Данный факт позволяет рассматривать параметры ШИМ не только как средство повышения визуального качества освещения, но и как фактор, напрямую влияющий на устойчивость фотосинтетического процесса [22].

Выбор в исследовании уровней в 8, 12 и 16 бит обусловлен тем, что именно этот диапазон отражает наиболее характерные варианты реализации цифрового диммирования в современных LED-драйверах. 8 бит соответствуют нижней границе, типичной для упрощённых или бюджетных систем управления, тогда как 12–16 бит характерны для драйверов, где требуется более плавное регулирование и высокая точность задания светового потока. Аналогично выбор частотного диапазона порядка 2–4 кГц связан с его инженерной реалистичностью для промышленных систем досветки, в которых необходимо одновременно обеспечить отсутствие видимого мерцания, приемлемый уровень электромагнитных помех и допустимые коммутационные потери. Таким образом, исследованные комбинации параметров ШИМ представляют не абстрактные режимы моделирования, а практически значимый диапазон характеристик реально применяемых драйверов LED-досветки.

Полученные результаты исследования вписываются в концепцию системного подхода к оценке продуктивности, когда рост и газообмен рассматриваются как результат интеграции во времени реакций на динамично изменяющиеся условия среды [23]. В отличие от чисто агрономических работ, например, [8], где пульсирующие режимы освещения анализируются преимущественно с точки зрения экономии энергии и сравнения средней урожайности, предложенная в работе модель явно описывает сквозное влияние цифровых ограничений в рамках цепочки «квантование $\rightarrow$ шум PPFD $\rightarrow$ вариация P_n ».

Результаты исследования создают основу для дальнейшей интеграции моделей управления освещением в более общие цифровые платформы Agriculture 4.0 и CEA, где требования к разрядности, частоте и алгоритмам управления можно выводить не только из электротехнических и экономических, но и из фотобиологических критериев.

Заключение. Авторами разработана расчётная модель влияния квантования цифрового ШИМ-управления LED-досветкой на чистую скорость фотосинтеза растений. В модели зафиксирована последовательность взаимосвязей «разрядность ШИМ $\rightarrow$ ошибка поддержания среднего PPFD $\rightarrow$ относительная вариабельность P_n », в качестве критерия достаточности разрядности использовано ограничение относительной вариабельности фотосинтетического отклика.

На модельной световой кривой томата показано, что максимальная чувствительность P_n к погрешности воспроизведения PPFD наблюдается в диапазоне 200–600 мкмоль $\cdot$ м $^{-2}$ с $^{-1}$, где наклон световой кривой максимален. В области светового насыщения влияние одинаковой по величине ошибки поддержания PPFD на P_n существенно снижается. Для принятых условий моделирования рассчитаны рекомендуемые диапазоны разрядности цифрового ШИМ-управления: в области умеренных PPFD применение 12-битного и более высокого разрешения обеспечило выполнение критерия относительной вариабельности P_n не более 1–2 %.

Практическая значимость работы заключается в том, что полученные соотношения позволяют при проектировании тепличных систем искусственного освещения переходить от эмпирического выбора разрядности и частоты ШИМ к их количественному обоснованию через фотобиологический критерий допустимой нестабильности P_n . Предложенные диапазоны параметров могут использоваться как ориентиры при разработке драйверов и контроллеров LED-досветки в рамках концепции Agriculture 4.0, где подсистема освещения рассматривается как киберфизический модуль с явными требованиями по качеству светового сигнала.

Полученные результаты относятся к стационарным световым режимам и параметризации фотосинтетической световой кривой томата. Влияние пульсаций тока, джиттера, спектральных эффектов, ошибок беспроводной передачи и неоднородности светового поля не учитывалось. Дальнейшие исследования целесообразно направить на экспериментальную верификацию модели на реальных культурах в теплицах и на вертикальных фермах, а также на ее расширение с учётом спектральных эффектов, нелинейных явлений типа прерывистого освещения и совместного влияния шумов освещённости и других факторов среды (температура, CO $_2$, водообеспечение).

Список литературы / References

1. Heuvelink E, Hemming S, Marcelis LFM. Some Recent Developments in Controlled-Environment Agriculture: On Plant Physiology, Sustainability, and Autonomous Control. *The Journal of Horticultural Science and Biotechnology*. 2025;100(5):604–614. <https://doi.org/10.1080/14620316.2024.2440592>
2. Bashkin V. Industry 4.0 As a Strategy for Increasing Agricultural Efficiency. *Life of the Earth*. 2024;46(3):298–310. https://doi.org/10.29003/m4185.0514-7468.2023_46_3/298-310
3. Samoylenko 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>

4. Tao Yang, Xueying Ouyang, Bo Wang, Di Tian, Cheng Xu, Zeyang Lin, et al. Understanding the Effects of Tree-Crop Intercropping Systems on Crop Production in China by Combining Field Experiments with a Meta-Analysis. *Agricultural Systems*. 2023;210:103705. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2023.103705>
5. Boyd AP, Zankowski P, Wheeler R, Stokes-Draut JR, Chudnovsky Y, Ingram D, et al. Controlled Environment Agriculture: An Opportunity to Strengthen Interagency Research Collaboration in the US Government. *PNAS Nexus*. 2025;4(6):155. <https://doi.org/10.1093/pnasnexus/pgaf155>
6. Kaiser E, Kusuma P, Vialet-Chabrand S, Folta K, Liu Y, Poorter H, et al. Vertical Farming Goes Dynamic: Optimizing Resource Use Efficiency, Product Quality, and Energy Costs. *Frontiers in Science*. 2024;2:1411259. <https://doi.org/10.3389/fsci.2024.1411259>
7. Hariyawan MY, Hidayat R, Firmansyah E. An Experimental Study of Conducted EMI Mitigation on the LED Driver Using Spread Spectrum Technique. *International Journal of Electronics and Telecommunications*. 2016;62(3):293–299. <https://doi.org/10.1515/eletel-2016-0041>
8. Kanechi M. Growth and Photosynthesis under Pulsed Lighting. In book: Cañedo JCG, Lizárraga GLL (eds). *Photosynthesis - From Its Evolution to Future Improvements in Photosynthetic Efficiency Using Nanomaterials*. London: InTech; 2018. <https://doi.org/10.5772/intechopen.75519>
9. Jishi T, Matsuda R, Fujiwara K. Effects of Photosynthetic Photon Flux Density, Frequency, Duty Ratio, and Their Interactions on Net Photosynthetic Rate of Cos Lettuce Leaves under Pulsed Light: Explanation Based on Photosynthetic-Intermediate Pool Dynamics. *Photosynth Research*. 2018;136:371–378. <https://doi.org/10.1007/s11120-017-0470-z>
10. Wei Wei, Guoyi Zhang, Jintian Lin, Lei Chen, Min Wang, Yuxin Tong. Effect of Frequency and Duty Cycle of a Full-Spectrum Pulsed LED Light Source on Plant Photosynthetic Rate. In: *Proceedings of the 3rd International Symposium on Water, Ecology and Environment*. Setúbal, Portugal: SciTePress; 2022. P. 144–149. <https://doi.org/10.5220/0011948800003536>
11. Cinq-Mars M, Samson G. Down-Regulation of Photosynthetic Electron Transport and Decline in CO₂ Assimilation under Low Frequencies of Pulsed Lights. *Plants*. 2021;10(10):2033. <https://doi.org/10.3390/plants10102033>
12. Bachouch L, Sewraj N, Dupuis P, Canale L, Zissis G. Pulse Width Modulation Current Control for LED Lighting Horticulture Systems. *IEEE Industry Applications Society Annual Meeting (IAS)*. New York City: IEEE; 2022. P. 1–6. <https://doi.org/10.1109/IAS54023.2022.9939775>
13. Zavafer A, Mancilla C, Jolley G, Murakami K. On the Concepts and Correct Use of Radiometric Quantities for Assessing the Light Environment and Their Application to Plant Research. *Biophysical Reviews*. 2023;15:385–400. <https://doi.org/10.1007/s12551-023-01051-y>
14. Egea G, Pérez-Urrestarazu L, González-Pérez J, Franco-Salas A, Fernández-Cañero R. Lighting Systems Evaluation for Indoor Living Walls. *Urban Forestry & Urban Greening*. 2014;13(3):475–483. <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2014.04.009>
15. Xinglin Ke, Hideo Yoshida, Shoko Hikosaka, Eiji Goto. Optimization of Photosynthetic Photon Flux Density and Light Quality for Increasing Radiation-Use Efficiency in Dwarf Tomato under LED Light at the Vegetative Growth Stage. *Plants*. 2021;11(1):121. <https://doi.org/10.3390/plants11010121>
16. Жуковская Н.В., Быстрова Е.И., Лунькова Н.Ф., Иванов В.Б. Сравнительный анализ роста корней разных видов растений на клеточном уровне. *Физиология растений*. 2020;67(4):369–377. <https://doi.org/10.31857/S0015330320040211>
Zhukovskaya NV, Bystrova EI, Lunkova NF, Ivanov VB. Root Growth at the Cellular Level in Plants of Different Species: Comparative Analysis. *Russian Journal of Plant Physiology*. 2020;67(4):369–377. <https://doi.org/10.31857/S0015330320040211>
17. Шиков А.С., Ивлиев С.Н. Математическое моделирование процессов фотосинтеза в объектах облучения. *Известия Самарского научного центра Российской академии наук*. 2019;21(3):83–88.
Shikov AS, Ivliev SN. Mathematical Modeling of Effectiveness of Irrigation Installations. *Izvestia of Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences*. 2019;21(3):83–88.
18. Yongsan Cheng, Nianhua Li, Zongyao Li, Aiwu Zhou, Bin Li, Yanxiu Miao. Analysis of Multi-Environment-Driven Variations in Net Photosynthetic Rate and Predictive Model Development for Tomatoes During Early Flowering and Fruit Development Stages in Winter Solar Greenhouses. *Horticulturae*. 2025;11:1367. <https://doi.org/10.3390/horticulturae11111367>
19. Lanoue J, St. Louis S, Little C, Soltaninejad S, Seguin R, Hao X. Dynamic Lighting Mitigates Photoperiodic Injury in Greenhouse Tomatoes. *Frontiers in Plant Science*. 2026;17:1731972. <https://doi.org/10.3389/fpls.2026.1731972>
20. Gosa SC, Lupo Y, Moshelion M. Quantitative and Comparative Analysis of Whole-Plant Performance for Functional Physiological Traits Phenotyping: New Tools to Support Pre-breeding and Plant Stress Physiology Studies. *Plant Science*. 2019;282:49–59. <https://doi.org/10.1016/j.plantsci.2018.05.008>
21. Shashko AYU, Bandarenka UYu, Mikhilchenko AA, Kalisha TG, Safonova OYu, Przhevalskaya DA, et al. Development of Woody Plants Phenotyping System with the Help of Machine Vision and Spectral Analysis Algorithms. *Journal of the Belarusian State University. Biology*. 2019;1:33–44. <https://doi.org/10.33581/2521-1722-2019-1-33-44>
22. Fangyi Zhao, Zhen Song, Quanlin Liu. Advances in Fe³⁺-activated Luminescent Materials for Near-Infrared Light Sources. *Progress in Solid State Chemistry*. 2024;74:100456. <https://doi.org/10.1016/j.progsolidstchem.2024.100456>

23. Исаева П.М., Ахмедова П.М. Влияние концентрации углекислого газа, кислотности и электропроводности на продуктивность томата в условиях гидропоники Чеченской Республики. *Аграрный вестник Северного Кавказа*. 2026;16(2):57–68. <https://doi.org/10.31279/2949-4796-2026-16-2-57-68>

Isaeva PM, Akhmedova PM. Effect of Carbon Dioxide Concentration, pH, and Electrical Conductivity on Tomato Yield in Hydroponics of the Chechen Republic. *Agrarian Bulletin of the North Caucasus*. 2026;16(2):57–68. <https://doi.org/10.31279/2949-4796-2026-16-2-57-68>

Об авторах:

Владимир Валерьевич Самойленко, кандидат технических наук, доцент кафедры «Инжиниринг и IT-решения» Ставропольского государственного аграрного университета (355035, Российская Федерация, г. Ставрополь, пер. Зоотехнический, 12), [SPIN-код](#), [ORCID](#), [ScopusID](#), [ResearcherID](#), [ResearchGate](#), samoilenko.vv@stgau.ru

Владимир Васильевич Федоренко, доктор технических наук, ведущий научный сотрудник Северо-Кавказского федерального университета (355017, Российская Федерация, г. Ставрополь, ул. Пушкина, 1), [SPIN-код](#), [ORCID](#), [ScopusID](#), [ResearcherID](#), fovin_25@mail.ru

Заявленный вклад авторов:

В.В. Самойленко: проведение исследования, курирование данных, формальный анализ, написание черновика рукописи, написание рукописи – рецензирование и редактирование.

В.В. Федоренко: проведение исследования, административное руководство исследовательским проектом, научное руководство.

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи

Декларация ИИ: авторы заявляют, что при подготовке текста рукописи не использовались технологии генеративного искусственного интеллекта (ИИ), ИИ не является соавтором публикации: авторство присвоено только физическим лицам, внёсшим существенный интеллектуальный вклад в исследование.

About the Authors:

Vladimir V. Samoylenko, Cand.Sci. (Eng.), Associate Professor of the Department of Engineering and IT-Solutions, Stavropol State Agrarian University (12, Zootechnichesky Lane, Stavropol, 355035, Russian Federation), [SPIN-code](#), [ORCID](#), [ScopusID](#), [ResearcherID](#), [ResearchGate](#); samoilenko.vv@stgau.ru

Vladimir V. Fedorenko, Dr.Sci. (Eng.), Senior Research Fellow at North-Caucasus Federal University (1, Pushkin Str., Stavropol, 355017, Russian Federation), [SPIN-code](#), [ORCID](#), [ScopusID](#), [ResearcherID](#), fovin_25@mail.ru

Claimed Contributorship:

VV Samoylenko: investigation, data curation, formal analysis, writing – original draft preparation, writing – review & editing.

VV Fedorenko: investigation, project administration, supervision.

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

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

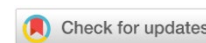
AI Declaration: the authors declare that generative artificial intelligence (AI) technologies were not used in the preparation of the manuscript and that AI is not a co-author of the publication: authorship is assigned only to natural persons who have made a substantial intellectual contribution to the research.

Поступила в редакцию / Received 03.06.2026

Поступила после рецензирования / Reviewed 25.06.2026

Принята к публикации / Accepted 06.07.2026

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



УДК 519.862

Оригинальное теоретическое исследование

<https://doi.org/10.23947/2687-1653-2026-26-3-2796>

Математическая модель воспроизводства человеческого капитала предприятий в условиях внедрения технологий искусственного интеллекта

А.И. Сухинов , К.А. Харитонов, Е.А. Угнич

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

Российская Федерация, <https://ror.org/00x5je630> ugnich77@mail.ru

EDN: YLJZZC

Аннотация

Введение. Для управления человеческим капиталом предприятия необходимым инструментом является разработка экономико-математической модели его развития. Существующие модели не учитывают комплексную динамику таких факторов, как интенсивность обучения, амортизация компетенций, внедрение новых технологий и мобильность работников. Как следствие, возникает потребность в экономико-математической модели воспроизводства трудовых ресурсов, дающей полное представление о их текущем состоянии и будущих параметрах. Цель данного исследования — разработать динамическую экономико-математическую модель воспроизводства человеческого капитала организаций с учетом ключевых факторов его трансформации и эмпирически проверить ее, основываясь на данных российских предприятий.

Материалы и методы. На основе теоретического анализа факторов, влияющих на воспроизводство человеческого капитала предприятий, выполнена их формализация для построения динамической экономико-математической модели. Для описания динамики развития человеческого капитала использованы логистические модели, в которых ее темп определяется одновременно внутренними управленческими решениями предприятия, структурными потерями ввиду устаревания компетенций и внешней конкурентной средой. Ввиду сложности получения корпоративных данных для апробации разработанной модели авторы использовали результаты опроса инженеров трех машиностроительных предприятий ($n = 617$). После обработки результатов опроса даны оценки коэффициентам α и β , характеризующим интенсивность обучения и внедрения искусственного интеллекта (ИИ).

Результаты исследования. В целях моделирования конкурентной динамики для совокупности предприятий в рамках отрасли сформирована система взаимосвязанных обыкновенных дифференциальных уравнений (ОДУ). Показано, что для калибровки представленной динамической модели на уровне предприятия необходимы данные, включающие HR-метрики, в числе которых интенсивность обучения, использования искусственного интеллекта, параметры мобильности и привлекательности, связанные с оплатой труда и кадровыми потоками. В ходе численного эксперимента на основе предлагаемой динамической экономико-математической модели выполнен пятилетний прогноз динамики человеческого капитала трех предприятий ($N = 3$) машиностроительной отрасли. Представлено три сценария, отражающие динамику трудовых ресурсов: 1) без межфирменного взаимодействия, 2) с учетом влияния зарплатной дифференциации, 3) с учетом дифференцированной активности корпоративной компенсационной политики. Полученные результаты подтвердили наличие эффекта насыщения для сценария 1, выраженное влияние конкуренции на рынке труда на динамику человеческого капитала для сценария 2 и значимость интенсивности обучения и использования технологий ИИ, что даже позволяет частично нивелировать неблагоприятное влияние конкурентной среды для сценария 3.

Обсуждение. Предлагаемая модель воспроизводства человеческого капитала составлена на основе системы ОДУ, что обеспечивает целостное, внутренне согласованное описание эволюции этого ресурса на предприятии под воздействием инвестиций в обучение работников, внедрения технологий ИИ и изменения конкурентной среды. Результаты апробации модели в рамках трех сценариев для трех предприятий согласуются с выводами других исследований. В частности, подтвержден эффект насыщения на уровне предприятия в среднесрочном периоде, а также положительное влияние роста оплаты труда, активизации обучения работников и внедрения ИИ на развитие человеческого капитала (особенно для организаций с невысоким изначальным его уровнем).

Заключение. Авторами предложен подход к моделированию воспроизводства человеческого капитала предприятия в условиях развития технологий ИИ, базирующийся на том, что компетенции работников формируются и утрачиваются со временем под совместным воздействием факторов обучения, обновления технологий и межфирменной мобильности. Данная экономико-математическая модель описывает динамику человеческого капитала как нелинейный процесс ограниченного роста относительно фиксированного отраслевого фронта, что обеспечивает сопоставимость параметров предприятий. Численный эксперимент на примере трех предприятий продемонстрировал прикладную интерпретируемость модели и значимость совместного учета вышеуказанных факторов.

Ключевые слова: математическое моделирование, система обыкновенных дифференциальных уравнений, человеческий капитал, искусственный интеллект

Благодарности. Авторы выражают благодарность редакции и рецензентам за внимательное отношение к статье и указанные замечания, устранение которых позволило повысить ее качество.

Финансирование. Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского научного фонда в рамках реализации проекта «Инклюзивная модель управления человеческим капиталом организаций машиностроительной отрасли в условиях развития технологий искусственного интеллекта». (Соглашение № 25-28-02983; <https://rscf.ru/project/25-28-02983/>).

Для цитирования. Сухинов А.И., Харитонов К.А., Угнич Е.А. Математическая модель воспроизводства человеческого капитала предприятий в условиях внедрения технологий искусственного интеллекта. *Advanced Engineering Research (Rostov-on-Don)*. 2026;26(3):2796. <https://doi.org/10.23947/2687-1653-2026-26-3-2796>

Original Theoretical Research

A Mathematical Model for Human Capital Reproduction in Enterprises under Artificial Intelligence Adoption

Alexander I. Sukhinov , Kirill A. Kharitonov, Ekaterina A. Ugnich  

Don State Technical University, Rostov-on-Don, Russian Federation, <https://ror.org/00x5je630>

 ugnich77@mail.ru

Abstract

Introduction. An economic-mathematical model of human capital development is an essential tool for managing a human capital of the enterprise. Existing models do not take into account the complex dynamics of such factors as training intensity, competence depreciation, introduction of new technologies, and worker mobility. Consequently, there arises a need for an economic-mathematical model of labor resource reproduction that provides a comprehensive picture of their current state and future parameters. The objective of the study is to develop a dynamic economic-mathematical model of the reproduction of human capital of enterprises, taking into account the key factors of its transformation, and to empirically validate it using data from Russian enterprises.

Materials and Methods. Based on a theoretical analysis of the factors affecting the reproduction of enterprise human capital, these factors have been formalized to construct a dynamic economic-mathematical model. Logistic models are employed to describe the dynamics of human capital development, wherein the rate of growth is determined simultaneously by the internal management decisions of the enterprise, structural losses due to competence obsolescence, and the external competitive environment. Given the difficulty of obtaining corporate data to validate the developed model, the authors utilized survey results from engineers at three machine-building enterprises ($n = 617$). Following the processing of the survey data, estimates were derived for the coefficients α and β , which characterize the intensity of artificial intelligence (AI) adoption and implementation.

Results. To model competitive dynamics for a group of enterprises within an industry, a system of interconnected ordinary differential equations (ODE) has been formulated. It is shown that calibrating the presented dynamic model at the enterprise level requires data that include HR metrics, such as the intensity of training and artificial intelligence adoption, as well as mobility and attractiveness parameters linked to remuneration and workforce flows. A numerical experiment based on the proposed dynamic economic-mathematical model was conducted to generate a five-year forecast of human

capital dynamics for three machine-building enterprises ($N = 3$). Three scenarios reflecting labor resource dynamics are presented: 1) without inter-firm interaction; 2) accounting for the impact of wage differentiation; and 3) accounting for varying levels of activity in corporate compensation policies. The results confirmed the presence of a saturation effect for Scenario 1, the pronounced impact of labor market competition on human capital dynamics for Scenario 2, and the significance of training intensity and AI technology usage — factors that can even partially offset the adverse effects of the competitive environment in Scenario 3.

Discussion. The proposed model of human capital reproduction is based on a system of ODE, providing a holistic and internally consistent description of how this resource evolves within an enterprise under the influence of investments in employee training, adoption of AI technologies, and changes in the competitive environment. The results of model testing across three scenarios for three enterprises align with the findings of other studies. In particular, the saturation effect at the enterprise level in the medium term is confirmed, as well as the positive impact of wage growth, increased employee training, and adoption of AI on the development of human capital (specifically, for organizations with a low initial level of it).

Conclusion. The authors propose an approach to modeling enterprise human capital reproduction amid the rise of AI technologies. The approach is based on the premise that employee competencies are formed and lost over time under the combined influence of training, technological renewal, and inter-firm mobility. This economic-mathematical model describes human capital dynamics as a nonlinear process of bounded growth relative to a fixed industry frontier, which provides comparability of enterprise parameters. A numerical experiment involving three enterprises has demonstrated the model practical interpretability and the importance of jointly accounting for the above factors.

Keywords: mathematical modeling, system of ordinary differential equations, human capital, artificial intelligence

Acknowledgments. The authors would like to thank the Editors and reviewers for their attentive attitude to the article and the specified comments that improved the quality of the article.

Funding Information. The research was done with the financial support of the Russian Science Foundation as part of the project “An Inclusive Model of Human Capital Management in Mechanical Engineering Organizations in the Context of the Development of Artificial Intelligence Technologies” (Agreement No. 25-28-02983, <https://rscf.ru/project/25-28-02983/>).

For Citation. Sukhinov AI, Kharitonov KA, Ugnich EA. A Mathematical Model for Human Capital Reproduction in Enterprises under Artificial Intelligence Adoption. *Advanced Engineering Research (Rostov-on-Don)*. 2026;26(3):2796. <https://doi.org/10.23947/2687-1653-2026-26-3-2796>

Введение. На современном этапе научно-технического прогресса ускоренное развитие технологий ИИ постепенно становится важным источником социально-экономического развития. Так, к 2035 году благодаря распространению и внедрению технологий ИИ ожидается рост мировой экономики на 15 %¹. В то же время некоторые исследователи [1] заявляют о незначительном влиянии ИИ на производительность, что позволяет говорить о парадоксе Солоу [2] в новых технологических условиях. Обусловлено это тем, что, несмотря на масштабный качественный переход новых технологий от базовых алгоритмов к большим языковым моделям, существующие производственные и бизнес-процессы [3], а также управленческие подходы ориентированы на исключительное участие человека и могут ограничивать темпы и объемы внедрения. В то же время трансформация этих процессов невозможна без оценки перспектив и ключевых факторов ее реализации. Непосредственно внедрение технологий ИИ происходит на уровне предприятий и оказывает влияние на трансформацию производственных процессов. В этом контексте развитие такого важного фактора производства, как человеческий капитал, за счет расширения знаний и компетенций работников выступает ключевым условием реализации потенциала ИИ [4] и преодоления парадокса Солоу. Вышеизложенное подчеркивает важность исследования воспроизводства на уровне предприятий.

В рамках классической теории человеческий капитал рассматривается с позиции инвестиций в образование, знания и навыки, приносящих экономическую отдачу в будущем. Родоначальники этой теории, Т. Шульц и Г. Беккер, рассматривают человеческий капитал как накопленный запас знаний, навыков, компетенций, идей, здоровья, способный генерировать поток доходов в будущем [5]. Расходы на обучение трактуются ими как инвестиции, а не источник затрат, что позволяет применять количественные методы оценки эффективности управленческих решений на уровне индивидов и предприятий.

Экономико-математическое моделирование является одним из основных инструментов исследования человеческого капитала. Оно позволяет формализовать взаимосвязь между различными факторами его развития и социально-экономическими результатами. В некоторых исследованиях [6] человеческий капитал рассматривается как фактор эндогенного роста, включающий в себя накопление профессиональных знаний и навыков, и интерпретируется как источник долгосрочной производительности.

¹ PwC Value in Motion: AI's economic stimulus impact could reach 15% by 2035 URL: <https://trademagazin.hu/en/pwc-value-in-motion-ai-gazdasaglenkito-hatas-a-2035-ig-clerheti-a-15-ot/> (дата обращения: 01.07.2026).

При этом в современных исследованиях подчеркивается усиление нелинейности процессов формирования и использования человеческих ресурсов вследствие ускоренного устаревания компетенций, развития новых технологий и мобильности рабочей силы [7]. Это актуализирует потребность в моделях, способных описывать изменение факторов, влияющих на персонал предприятий во времени и с учетом конкурентной среды.

Для построения динамической экономико-математической модели воспроизводства человеческого капитала необходимо определить, какие факторы его изменения являются ключевыми в современных условиях и как они описываются в литературе.

Одной из наиболее распространенных моделей его оценки через отдачу от образования является уравнение Минцера [8]. Оно связывает уровень заработной платы с продолжительностью обучения и трудовым опытом. Эмпирические данные подтверждают корреляцию показателей образования с ростом доходов и производительности, что делает инвестиции в обучение важным источником накопления человеческого капитала [9]. Вместе с тем в некоторых исследованиях показано, что отдача от образования неоднородна по когортам, профессиям и секторам экономики [10], что может проявляться ее нелинейность и зависимость от технологических изменений [11]. Это означает, что оценка человеческого капитала через статические регрессионные зависимости не полностью отражает процессы его воспроизводства на уровне предприятия, где важно учитывать скорость обучения, устаревание компетенций и условия конкурентной среды.

Современный этап научно-технического прогресса усиливает динамику развития трудовых ресурсов, поскольку компетенции работников способны не только накапливаться, но и устаревать под воздействием новых технологий и изменений требований к профессиональным задачам. Поэтому их целесообразно рассматривать как актив, подверженный амортизации [12]. В некоторых исследованиях доказывается, что скорость устаревания компетенций неодинакова для разных уровней образования и типов задач и может возрастать в профессиях, связанных с нерутинными аналитическими и креативными функциями [13]. В условиях ускорения научно-технического прогресса «полураспад» высокотехнологичных знаний ускоряется, что повышает значимость непрерывного обучения и переобучения.

Для моделирования на микроуровне это обстоятельство свидетельствует о том, что человеческий капитал предприятия должен описываться не только через механизм накопления компетенций, но и через механизм их устаревания, потери стоимости, обуславливающий амортизацию. При этом амортизация выступает не разовым, случайным, а систематическим процессом, отражающим форму последующего возмещения потерь [14], которые могут возникнуть даже в условиях роста инвестиций в обучение работников.

Отдельное направление современных исследований связано с оценкой влияния технологий ИИ на трудовые ресурсы. Эмпирические исследования результатов внедрения ИИ-ассистентов на основе больших языковых моделей в некоторых профессиях демонстрируют их способность ускорять выполнение рабочих процедур и повышать производительность прежде всего у менее опытных сотрудников [15, 16]. Данный эффект связан не только с оперативным получением информации работниками в текущий момент, но и с аккумуляцией знаний: сотрудники, активно использующие рекомендации от ИИ-ассистентов, со временем демонстрируют устойчивое улучшение результатов работы, что влияет на накопление человеческого капитала в целом.

Для экономико-математического моделирования это означает, что ИИ может выступать отдельным фактором развития человеческого капитала, влияющего на его динамику во времени. Стоит отметить, что максимальные выигрыши здесь характерны для групп с низким исходным уровнем навыков, тогда как для высококвалифицированных работников прирост может быть слабее. Следовательно, вклад ИИ в модель динамики человеческих ресурсов должен учитываться как систематический источник ускорения, потенциально зависящий от состояния системы (уровня человеческого капитала, в частности, компетенций) и контекста производственных задач.

Еще одним фактором, влияющим на развитие человеческого капитала предприятия, является межфирменная мобильность работников. Традиционно она рассматривается как фактор риска для окупаемости инвестиций в обучение, поскольку предприятие несет затраты, связанные с обновлением компетенций. Однако часть из них может не окупиться ввиду увольнения сотрудников [17]. Современные исследования показывают, что мобильность одновременно является каналом распространения знаний и практик между организациями. Исследование на примере обрабатывающих отраслей показало, что найм работников из более производительных предприятий приводит к повышению производительности принимающего предприятия, причем эффект носит асимметричный характер, поскольку приток из продуктивных предприятий более выражен и значим [18]. Также в этих исследованиях подчеркивается значимость отраслевой специфики, поскольку переходы внутри отрасли обеспечивают передачу наиболее подходящих компетенций.

Таким образом, динамика человеческого капитала предприятия определяется не только внутренними инвестициями, но и внешним притоком либо оттоком работников с необходимыми компетенциями. Следовательно, предприятие может накапливать человеческие ресурсы, привлекая работников с необходимыми компетенциями, но может и терять его при оттоке кадров.

Рассмотренные факторы развития и особенности человеческого капитала позволяют сформулировать ключевые требования к модели его воспроизводства, которые включают в себя процессы формирования, накопления и использования. Во-первых, модель должна быть динамической, то есть описывать кадровый потенциал как изменяющуюся во времени систему, в которой одновременно действуют механизмы накопления и технологически обусловленной утраты компетенций работников [12, 19].

Во-вторых, с учетом убывающей предельной отдачи при приближении к ведущим практикам отрасли динамика человеческого капитала должна быть нелинейной и принимать во внимание ограниченность накопления компетенций [20].

В-третьих, в условиях распространения технологий ИИ необходимо выделять их вклад как фактора, способного оказывать влияние на распространение знаний на предприятии, причем эффект может быть неоднородным для разных профессиональных групп [21].

Наконец, модель должна учитывать внешнюю конкурентную среду [18], поскольку межфирменная мобильность способствует притоку либо оттоку работников с необходимыми компетенциями, что требует обязательного учета взаимодействий предприятий и допускает переход от уравнения для отдельного предприятия к системной постановке для набора конкурентов. Удобной основой для такой постановки выступает использование относительных показателей человеческих ресурсов, интерпретируемых как позиция предприятия в отрасли, что обеспечивает сопоставимость предприятий и задает естественное ограничение динамики.

Несмотря на значительное количество работ, посвященных исследованию человеческого капитала и моделированию факторов его развития, большинство из них не учитывает в полной мере взаимосвязанные процессы на уровне предприятия: корпоративное обучение, амортизацию компетенций, внедрение новых технологий и мобильность работников. Как следствие, у предприятий отсутствуют формализованные инструменты для оценки того, как инвестиции в обучение, внедрение ИИ и кадровая мобильность совместно формируют траекторию развития человеческого капитала в перспективе. Разработка экономико-математической модели воспроизводства человеческого капитала позволит комплексно оценить его текущее и перспективное состояние, обеспечив тем самым научную обоснованность управленческих решений на предприятиях.

Целью данной статьи является разработка и апробация динамической экономико-математической модели воспроизводства человеческого капитала на уровне предприятия с учетом ключевых факторов его трансформации. Для достижения этой цели необходимо решить следующие задачи:

- обосновать факторы воспроизводства человеческих ресурсов предприятий в условиях распространения технологий ИИ;
- построить динамическую модель воспроизводства человеческого капитала на основе системы ОДУ;
- провести апробацию динамической модели воспроизводства человеческого капитала на основе реализации трех сценарных прогнозов;
- разработать предложения и практические рекомендации по совершенствованию управления человеческими ресурсами предприятий на основе результатов апробации.

Материалы и методы. *Показатели человеческого капитала и факторы динамики.* Для построения динамической экономико-математической модели воспроизводства человеческого капитала введены сопоставимые показатели уровня компетенций работников и формализованы факторы, влияющие на их изменение во времени. В рамках настоящего исследования человеческий потенциал рассматривается на уровне предприятия с учетом профессиональной структуры персонала и конкурентного окружения.

Если совокупность предприятий отрасли представить как $j = 1, 2, \dots, N$, а профессиональные группы работников как $i = 1, 2, \dots, M$, то показатель человеческого капитала профессиональной группы i предприятия j в момент времени t примет вид:

$$H_{ji} = H_{ji}(t). \quad (1)$$

Величина $H_{ji}(t)$ (1) интерпретируется как интегральная количественная оценка уровня знаний, навыков, опыта и прикладных компетенций работников соответствующей профессиональной группы. На практике $H_{ji}(t)$ может формироваться на основе внутренних HR-метрик [19] (результаты аттестаций и оценок компетенций), показателей производительности труда, данных о прохождении обучения, а также других инструментов HR-аналитики. Для удобства H_{ji} может измеряться в условных баллах (нормированных индексах).

Для предприятия, являющегося объектом исследования, показатель записывается как уравнение (2).

$$H_{0i} = H_{0i}(t). \quad (2)$$

Для учёта конкурентного положения предприятия вводится отраслевой максимум человеческого капитала по профессиональной группе i :

$$H_{maxi} = \max_{1 \leq j \leq N} \{H_{ji}\}. \quad (3)$$

В дальнейшем величина H_{maxj} будет рассматриваться как фиксированный отраслевой фронтир по профессиональной группе i на горизонте моделирования. На практике H_{maxi} (3) задаваться как максимум по наблюдаемой выборке предприятий в базовый момент времени t_0 , бенчмарк лучшей практики отрасли, либо нормативное (целевое) значение компетенций. Такое допущение позволяет интерпретировать $h_{ji}(t)$ как позицию предприятия относительно заданного эталона и использовать автономную динамику для $h_{ji}(t)$. Учет эндогенного изменяющегося во времени фронта $H_{maxi}(t)$, пересчитываемого как максимум текущего состояния среди предприятий, требует отдельной модификации модели и выходит за рамки настоящей статьи.

На его основе определяется относительный показатель человеческого капитала [20]:

$$h_{ji} = \frac{H_{ji}}{H_{maxi}}, 0 \leq h_{ji} \leq 1. \quad (4)$$

Для рассматриваемого предприятия

$$h_i(t) = \frac{H_{0i}(t)}{H_{maxi}}. \quad (5)$$

Следовательно, значение $h_{ji} = 1$ (4) соответствует уровню лидера (максимально наблюдаемому в отрасли), а снижение h_{ji} отражает отставание по качеству и актуальности компетенций соответствующей профессиональной группы. Использование относительной шкалы обеспечивает сопоставимость предприятий и профессиональных групп при различии абсолютных метрик, а также позволяет учитывать ограничение роста, поскольку приближение к фронтиру сопровождается снижением возможностей дальнейшего ускорения накопления человеческих ресурсов.

Ключевые управляемые воздействия, формирующие динамику человеческого капитала, задаются через следующие показатели:

- инвестиции в образование и развитие профессиональной группы i [22, 5]:

$$EDU_i = EDU_i(t); \quad (6)$$

- уровень внедрения и использования технологий ИИ в деятельности группы [21]:

$$AI_i = AI_i(t). \quad (7)$$

Переменные $EDU_i(t)$ и $AI_i(t)$ характеризуют соответственно интенсивность внутрифирменного обучения (6) и степень использования ИИ-инструментов в деятельности профессиональной группы i (7). В прикладных расчетах они могут задаваться на основе корпоративной статистики и рассматриваются как управляемые параметры кадровой политики и цифровой трансформации.

Для описания реакции человеческого капитала на управленческие воздействия и внешнюю среду вводятся параметры:

- α_i — коэффициент эффективности образовательных инвестиций для группы i , определяемый как скорость/результативность накопления компетенций при заданной интенсивности EDU_i ;
- β_i — коэффициент влияния внедрения ИИ на динамику трудовых ресурсов группы i , определяемый как ускорение обучения, повышение эффективности применения знаний, диффузия лучших практик внутри предприятия;
- $\delta_i > 0$ — коэффициент амортизации человеческого капитала группы i , определяемый как темп устаревания компетенций под воздействием технологических изменений и обновления требований к задачам;
- γ_{ji} — коэффициент межфирменного взаимодействия/мобильности, показывающий вклад человеческих ресурсов предприятия j в динамику рассматриваемого предприятия по группе i . Он отражает интенсивность и направленность перераспределения компетенций через рынок труда.

В прикладной постановке коэффициент γ связывается с дифференциацией оплаты труда между предприятиями, поскольку различия в заработной плате выступают одним из ключевых факторов межфирменной мобильности работников. В частности, коэффициент привлекательности перехода может быть задан в виде:

$$\gamma_{ji} = \delta_{ji} \cdot \left(1 - \frac{P_{ji}}{P_i}\right), \quad (8)$$

где δ_{ji} — параметр интенсивности мобильности (склонность к переходам) для профессиональной группы i ; P_{ji} — средняя заработная плата работников группы i предприятия j ; P_i — средняя заработная плата работников группы i на предприятиях отрасли.

Такая специфика отражает рост привлекательности перехода по мере увеличения разрыва в оплате труда в пользу принимающего предприятия.

Предложенная система показателей ориентирована на практическое использование их предприятиями в целях управления персоналом и стратегического планирования развития человеческого капитала.

В совокупности такая формализация факторов человеческого потенциала создает основу для построения его динамической модели, которая позволяет анализировать траектории развития $h_i(t)$ при различных стратегиях обучения работников, внедрения ИИ и условиях конкурентной среды.

Динамическая модель воспроизводства человеческого капитала предприятия. В прикладных задачах управления массовыми процессами широко используются нелинейные модели логистического типа, в которых скорость изменения показателя пропорциональна его текущему уровню и/или интенсивности внешнего воздействия и остаточной ёмкости системы. Для примера можно привести модель рекламной кампании двух конкурирующих фирм в виде задачи Коши для системы нелинейных ОДУ [23], где темп роста числа покупателей каждого товара определяется интенсивностью рекламы и межтоварным взаимодействием, а ограничение роста задаётся множителем вида $(N_0 - N_1 - N_2)$, отражающим конечную ёмкость рынка. Для случая постоянных коэффициентов в указанной работе получено решение в замкнутом виде.

С учётом вышеуказанных факторов и показателей, включая (6), (7), (8), динамика относительного уровня человеческого капитала предприятия по профессиональной группе i описывается следующим дифференциальным уравнением:

$$\frac{dh_i}{dt} = \left(\alpha_i EDU_i h_i + \beta_i AI_i h_i - \delta_i h_i + \sum_{j=1}^N \gamma_{ji} h_{ji} \right) (1 - h_i). \quad (9)$$

Уравнение (9) отражает нелинейную динамику, в которой темп изменения человеческого капитала определяется одновременно внутренними решениями предприятия (обучение и цифровые технологии), структурными потерями (амортизация) и внешней конкурентной средой (межфирменная мобильность работников).

Таким образом, в рамках управления персоналом можно выделить несколько ключевых рычагов. Во-первых, предприятие может воздействовать на траекторию $h_i(t)$ через интенсивность обучения ($EDU_i(t)$) и обновление компетенций, увеличивая вклад обучения в накопление человеческого капитала. Во-вторых, ускорение его накопления возможно за счет внедрения технологий ИИ ($AI_i(t)$), которые способны повысить эффективность выполнения задач. В-третьих, особенно важно учитывать амортизацию человеческого капитала. Так, при высоких значениях δ_i поддержание и увеличение $h_i(t)$ требует систематических инвестиций, иначе траектория может перейти к стагнации или снижению. Наконец, в-четвертых, межфирменная мобильность задает внешнюю компоненту динамики, так как конкурентные условия на рынке труда способны усиливать или ослаблять эффект внутренних инвестиций, что делает необходимым согласование политики обучения и внедрения ИИ с политикой удержания и привлечения кадров.

Эмпирические данные. В условиях имеющейся сложности получения корпоративных данных для апробации данной модели использовались результаты опроса работников трех машиностроительных предприятий. Все респонденты ($n = 617$) относятся к одной профессиональной группе — инженеры. Анализируемые предприятия сопоставимы по размеру, имеют одинаковую отраслевую принадлежность. Вопросы анкеты касались интенсивности формального и неформального обучения работников, а также внедрения технологий ИИ. На основе расчета и нормирования индексов обучения и внедрения искусственного интеллекта получены коэффициенты α и β . Опрос работников проводился в мае–июне 2026 года.

Результаты исследования. Система ОДУ для совокупности конкурирующих предприятий. Уравнение (9) включает в себя межфирменный компонент, зависящий от уровней человеческого капитала других предприятий отрасли через величины вида $h_{ji}(t)$. Следовательно, при рассмотрении конкурентной среды как эндогенной, траектория $h_i(t)$ рассматриваемого предприятия не может быть определена без описания динамики $h_{ji}(t)$ для других фирм. В этом смысле модель одного предприятия является незамкнутой, так как правая часть задается внешними по отношению к нему переменными, которые в реальности также изменяются.

Практически возможны два варианта применения модели.

1. Траектории $h_{ji}(t)$ задаются извне — например, на основе экспертных сценариев, отраслевых прогнозов или исторических данных (с аппроксимацией тенденций на коротком горизонте). В этом случае уравнение для рассматриваемого предприятия решается как задача с заданным внешним воздействием со стороны конкурентной среды.

2. Если целью является моделирование конкурентной динамики (включая обратные связи, эффекты «догоняющего развития», перетоки компетенций и изменение расстановки сил в отрасли), то траектории конкурентов не могут задаваться произвольно, они должны получаться из уравнений такого же типа. Это приводит к необходимости записи уравнения для каждого предприятия и к формированию системы взаимосвязанных ОДУ.

В системной постановке динамика относительного кадрового потенциала задаётся для всех предприятий отрасли. Для каждого предприятия человеческий капитал описывается уравнением, аналогичным (9), где межфирменный поток отражает влияние остальных участников рынка труда. Таким образом, межфирменная мобильность выступает механизмом связности системы, так как изменения кадрового потенциала одной организации становятся фактором динамики других организаций.

Для фиксированной профессиональной группы i система для N предприятий может быть представлена следующим образом:

$$\begin{cases} \left| \frac{dh_{1i}}{dt} \right| = \left(\alpha_i EDU_{1i} h_{1i} + \beta_i AI_{1i} h_{1i} - \delta_i h_{1i} + \sum_{j=1}^N \gamma_{j1,i} h_{ji} \right) (1 - h_{1i}), \\ \left| \frac{dh_{2i}}{dt} \right| = \left(\alpha_i EDU_{2i} h_{2i} + \beta_i AI_{2i} h_{2i} - \delta_i h_{2i} + \sum_{j=1}^N \gamma_{j2,i} h_{ji} \right) (1 - h_{2i}), \\ \vdots \\ \left| \frac{dh_{Ni}}{dt} \right| = \left(\alpha_i EDU_{Ni} h_{Ni} + \beta_i AI_{Ni} h_{Ni} - \delta_i h_{Ni} + \sum_{j=1}^N \gamma_{jN,i} h_{ji} \right) (1 - h_{Ni}). \end{cases} \quad (10)$$

В данной системе $h_{ki}(t)$ — относительный человеческий капитал k -й фирмы по группе i ; $EDU_{ki}(t)$ и $AI_{ki}(t)$ — фирменно-специфичные управляемые воздействия; коэффициенты $\gamma_{jk,i}$ отражают межфирменные связи (интенсивность/направление перетока компетенций), из-за чего динамика каждой фирмы зависит от траекторий остальных.

Данные, калибровка параметров и конфиденциальность. Предложенная система ОДУ (10) допускает системную постановку задач для набора предприятий, однако её практическая реализация сталкивается с принципиальным ограничением: полнота сведений анализируемого предприятия существенно отличается от показателей конкурентов. Внутрифирменные HR-сведения (оценки компетенций, обучение, использование ИИ, текучесть кадров и причины увольнений) могут быть доступны лишь на анализируемом предприятии, тогда конкурирующими организациями такие данные, как правило, не публикуются, они фрагментарны или защищены режимом коммерческой тайны. Следовательно, даже при корректной записи системы ОДУ для N предприятий возникают проблемы идентифицируемости параметров конкурентов и в ряде случаев невозможности прямой эмпирической калибровки всей системы.

Для калибровки динамической модели на уровне предприятия необходимы данные четырёх типов, включающие в себя метрику человеческого капитала $H_{ji}(t) / h_{ji}(t)$, интенсивность EDU , использование ИИ (AI), параметры мобильности и привлекательности γ , включая компоненты, связанные с оплатой труда и кадровыми потоками.

Для анализируемого предприятия часть этих данных можно получить из внутренних источников, таких как оценки уровня владения компетенциями, расчет индексов обучения персонала на основе его объема и охвата, информация об использовании технологий ИИ, сведения из отдела кадров о поступлении и увольнении работников и т.п.

Для оценки конкурирующих предприятий наиболее критично то, что не публикуются или публикуются в неполном виде следующие данные:

- оценка уровня владения компетенциями и матрица компетенций по профессиональным группам, что является основой для $H_{ji}(t)$;
- сведения об обучении персонала, охват и эффективность, что является основой для $EDU_{ji}(t)$ и α_i ;
- реальный уровень внедрения и использования технологий ИИ на рабочих местах, что служит основой для $AI_{ji}(t)$ и β_i ;
- динамика кадровых потоков между конкретными парами предприятий и по группам, что составляет основу для γ ;
- структура заработной платы по профессиональным группам, которая частично может быть получена из обзоров вакансий, но редко бывает сопоставима и полна.

Отдельные публичные индикаторы, даже если они доступны, не могут заменить ключевых метрик, необходимых для прямой оценки параметров в уравнениях конкурентов.

Причина ограниченной наблюдаемости конкурентов состоит не только в сложности получения их данных, но и в их экономическом содержании. Для предприятий показатели $H(t)$, $EDU(t)$, $AI(t)$ и параметры α , β , δ , γ фактически описывают внутреннюю эффективность управления человеческим капиталом и внедрение новых технологий, а также позицию на рынке труда. Публикация таких данных создает конкурентные риски, поскольку позволяет другим участникам делать выводы о слабых местах в подготовке персонала, внедрения ИИ, уязвимости к оттоку кадров. Это может способствовать развитию стратегии переманивания.

Поэтому для конкурирующих предприятий прямое оценивание α , β , δ по открытым источникам обычно невозможно. В результате параметры конкурентов в системной модели приходится задавать следующими способами:

- сценарно — через несколько реалистичных наборов параметров для конкурентов;
- интервально — через верхние/нижние границы на основе отраслевых исследований и косвенных индикаторов;
- косвенно — через подбор параметров, согласующий модель с доступными агрегатами: темпы роста производительности, динамика выручки на работника, публичные данные по найму/вакансиям и т.п.

Апробация динамической модели воспроизводства человеческого капитала с учетом трех сценариев и рекомендации для предприятий. Для апробации системной модели (10) анализируется человеческий капитал трех предприятий ($N = 3$) одной отрасли и одной профессиональной группы ($M = 1$). Динамика описывается относительным показателем человеческого капитала $h_N(t) \in [0; 1]$, интерпретируемым как позиция N -го предприятия относительно фиксированного отраслевого фронта. Интенсивность мобильности работников взята как константа, равная 0,05. Горизонт моделирования составляет пять лет ($T = 5$), единица времени — год.

Начальные условия выбраны так, чтобы первое предприятие (фирма 1) находилось вблизи фронта:

$$h_1(0) = 0,95, h_2(0) = 0,65, h_3(0) = 0,45.$$

Амортизация компетенций задается параметром $\delta = 0,012$ (1,2 % в год), что соответствует эмпирическим оценкам темпов устаревания компетенций для работников с университетским образованием [12].

Управляемые воздействия EDU_N и AI_N задаются в виде констант (сценарных уровней интенсивности) на всем горизонте моделирования. В базовой конфигурации принимаются следующие значения:

$$EDU_N = AI_N = 0,3, N = 1, 2, 3.$$

Коэффициенты эффективности обучения α_N и внедрения ИИ β_N получены в ходе опроса сотрудников трех предприятий и представлены в таблице 1.

Таблица 1

Коэффициенты обучения и внедрения ИИ трех предприятий

Предприятие	α	β
Фирма 1	0,51	0,42
Фирма 2	0,64	0,48
Фирма 3	0,49	0,54

Далее представлено несколько сценариев динамики человеческого капитала предприятий на пятилетнем временном отрезке.

Сценарий 1 (рис. 1) демонстрирует динамику без межфирменного взаимодействия ($\gamma = 0$). На всех трех предприятиях наблюдается рост относительного кадрового потенциала, что связано с тем, что совокупный вклад управляемых факторов (EDU, AI) превышает потери от амортизации δ . Предприятие (фирма 1), находящееся близко к фронту, демонстрирует ожидаемое замедление темпа роста человеческого капитала из-за множителя $(1 - h_1)$, за 5 лет $h_1(t)$ плавно приближаясь к 1. Человеческий капитал другого предприятия (фирма 2) растет быстрее третьего предприятия (фирма 3) и к концу горизонта прогнозирования достигает более высокой траектории $h_2(t)$, что соответствует большим значениям эффективности обучения (α_2) при сопоставимых управляемых воздействиях. Человеческий капитал предприятия (фирма 3) растет из-за более низкого начального уровня и на горизонте пяти лет сокращает разрыв с предприятием (фирма 2), но остается позади него.

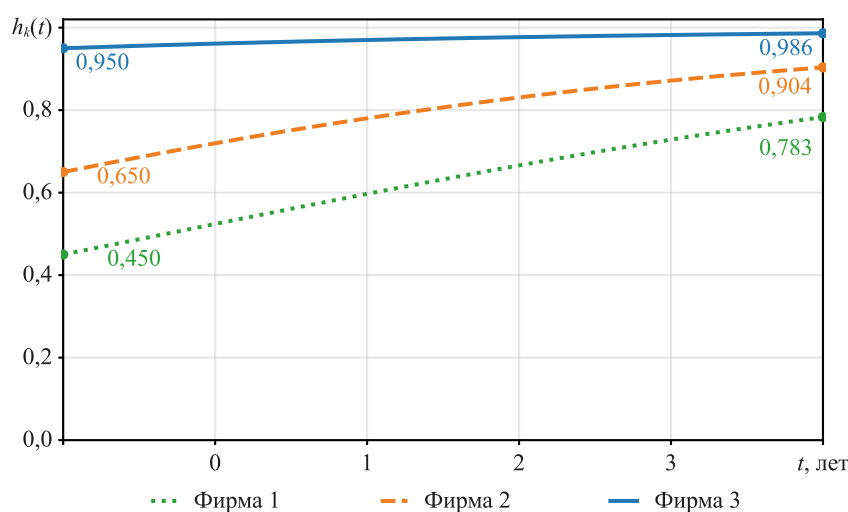


Рис. 1. Первый сценарий динамики человеческого капитала трех предприятий.

Сценарий 1: зарплаты одинаковые ($\gamma = 0$), $EDU = AI = 0,3$

Сценарий 2 (рис. 2) демонстрирует влияние зарплатной дифференциации на динамику через компоненту $\gamma_{j \rightarrow k}$. Повышение заработной платы в фирме 2 формирует дополнительное преимущество воспроизводства человеческого капитала за счет межфирменных перетоков: траектория $h_2(t)$ становится выше, по сравнению с базовым

случае (при прочих равных условиях). Одновременно у фирм 1 и 3 возникает неблагоприятная внешняя компонента (частичный отток в пользу фирмы 2), что ослабляет темпы роста их человеческого капитала относительно сценария 1. При выбранном масштабе мобильности $\delta^{mob} = 0,05$ и горизонте в пять лет эффект проявляется умеренно, однако он меняет интерпретацию, так как даже при одинаковых инвестициях в обучение и внедрении ИИ конкурентное преимущество может создаваться через рынок труда и компенсационную политику предприятия.

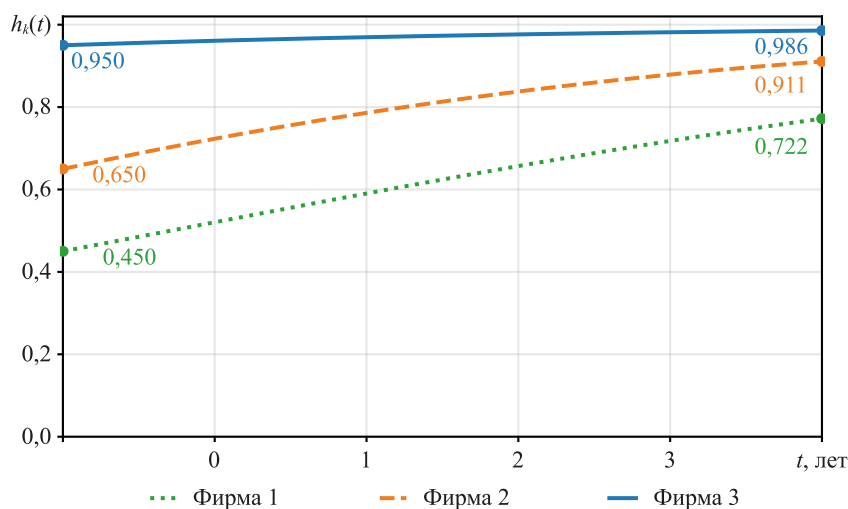


Рис. 2. Второй сценарий динамики человеческого капитала трех предприятий.
Сценарий 2: зарплаты в фирме 2 +20 %, $EDU = AI = 0,3$

Сценарий 3 (рис. 3) демонстрирует активность корпоративной компенсационной политики: при сохранении преимущества в заработной плате на фирме 2 фирма 3 увеличивает интенсивность обучения и внедрения ИИ. В результате траектория $h_3(t)$ ускоряется, и на горизонте в пять лет фирма 3 существенно сокращает разрыв с фирмами 1 и 2. Кроме этого, на рис. 3 показано, что к концу периода человеческий капитал предприятия 3 приближается к уровню предприятия 2 и в перспективе способен его опередить. Это говорит о том, что управляемые инвестиции в развитие компетенций и внедрение новых технологий способны частично или полностью компенсировать неблагоприятные условия конкуренции за кадры, исходя из разрыва в заработной плате.

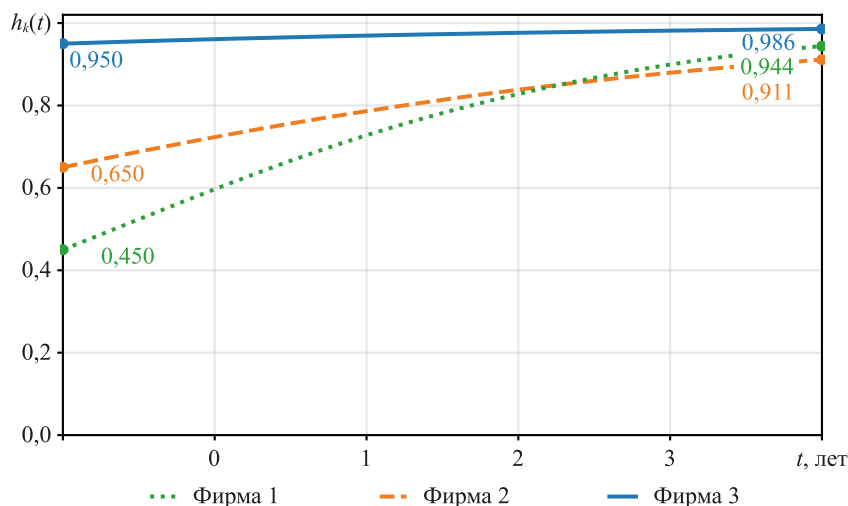


Рис. 3. Третий сценарий динамики человеческого капитала трех предприятий.
Сценарий 3: зарплаты в фирме 2 +20 %, фирма 3: $EDU = AI = 0,6$

Полученные результаты исследования позволяют сформулировать несколько выводов, имеющих прикладное значение для управления кадровым потенциалом предприятий. Во-первых, позиция предприятия относительно отраслевого фронта определяет предельный темп развития человеческого капитала: предприятия, находящиеся ближе к фронтиру (как фирма 1 в данном случае), демонстрируют более медленное увеличение показателя $h(t)$ в силу эффекта насыщения, задаваемого множителем $(1 - h)$. Это означает, что для лидеров приоритетом становится не столько ускоренное наращивание компетенций, сколько удержание достигнутого уровня, тогда как для отстающих предприятий актуальны стратегии «догоняющего развития».

Во-вторых, результаты показывают, что конкуренция на рынке труда способна существенно изменять динамику человеческого капитала даже при одинаковых управляемых воздействиях EDU и AI . В частности, повышение уровня оплаты труда (сценарий 2) повышает траекторию развития человеческого потенциала предприятия за счет внешней компоненты γ , отражающей межфирменные перетоки работников, обладающих необходимыми актуальными компетенциями. Следовательно, программы обучения и внедрения ИИ должны рассматриваться совместно с инструментами удержания персонала, поскольку эти элементы формируют общий результат в динамике человеческого капитала.

Наконец, сценарий 3 демонстрирует компенсирующий потенциал управляемых инвестиций в обучение. Так, повышение интенсивности обучения и использования технологий ИИ позволяет частично нивелировать неблагоприятное влияние конкурентной среды и ускорить сближение с фронтиром даже при менее выгодной зарплатной позиции. Это свидетельствует о том, что эффективная стратегия управления человеческим капиталом в условиях развития новых технологий должна опираться на согласованное применение рычагов развития (обучения и внедрения технологий ИИ) и рычагов удержания (условий труда и конкурентной оплаты).

Рассмотрены сценарии, при которых происходит сокращение инвестиций в человеческий капитал предприятия и, как следствие, возможен переход к его стагнации или деградации. За основу взята базовая постановка, соответствующая сценарию 1, в котором заработные платы предприятий равны ($P_1 = P_2 = P_3$). Будет проанализировано предприятие 2, для которого поочередно моделируются управленческие ошибки при неизменных параметрах фирм 1 и 3.

При сценарии сокращения инвестиций в обучение персонала на предприятии 2, представленном на рис. 4 а, у него замедляется рост и вместо прироста в 0,2537, как в базовом сценарии, оно получает прирост только в 0,1323 пункта. При прекращении инвестиций во внедрение ИИ его рост сокращается и достигает только 0,1704 пункта, что представлено на рис. 4 б. На рис. 4 в показан сценарий сокращения зарплат, что также замедляет рост в интервале пяти лет, который составляет 0,1962 пункта. Если же применены одновременно все факторы данных управленческих действий, то предприятие начинает терять трудовые ресурсы, как это видно на рис. 4 г, и потеря составляет 0,1919 пункта.

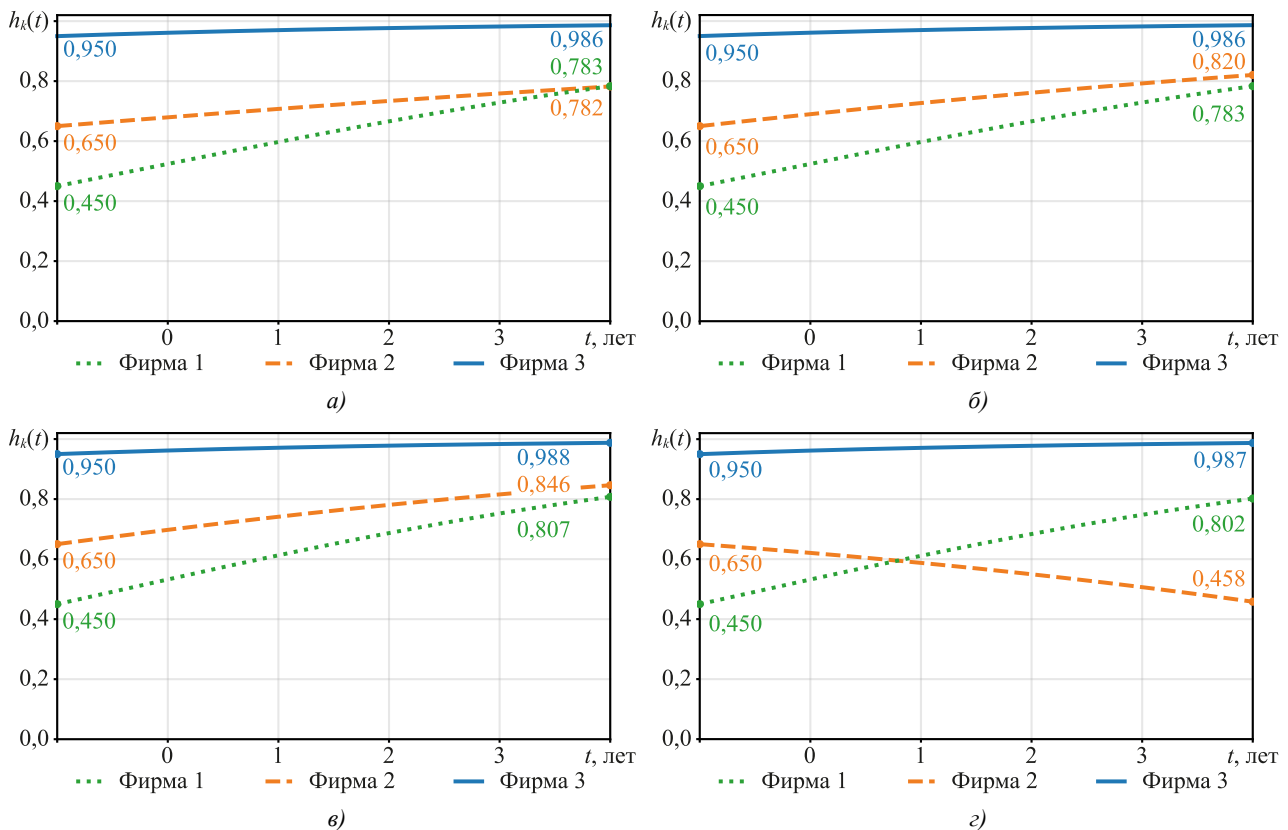


Рис. 4. Динамика человеческого капитала при неблагоприятных управленческих сценариях: а — снижение инвестиций в обучение ($EDU_2 = 0,0$); б — снижение инвестиций в внедрение ИИ ($AI_2 = 0,0$); в — снижение зарплат ($P_2 = 25,0$ k; $P_1 = P_3 = 50,0$ k); г — комбинированная управленческая ошибка ($EDU_2 = 0,0$; $AI_2 = 0,0$; $P_2 = 25,0$ k)

Представленные результаты демонстрируют, что при сокращении только внутренних инвестиций на фирме 2 показатель $h_2(t)$ продолжает расти, однако существенно медленнее базового сценария. При этом траектории фирм 1 и 3 совпадают с базовыми, поскольку при равенстве зарплат межфирменный компонент γ равен нулю, и динамика фирм оказывается автономной. В сценарии снижения заработной платы на фирме 2 происходит перераспределение человеческого капитала через межфирменную мобильность. Наиболее критичная ситуация наблюдается в комбинированном сценарии. При одновременном сокращении обучения и внедрения ИИ на фоне зарплатного проигрыша фирма 2 переходит в режим деградации человеческого капитала.

В таблице 2 показаны численные результаты данных управленческих решений для всех рассмотренных предприятий.

Таблица 2

Состояние человеческого капитала при неблагоприятных управленческих сценариях

Сценарий	$h_1(t)$	$h_2(t)$	$h_3(t)$
Базовый	0,9863	0,9037	0,7832
EDU2 = 0	0,9863	0,7823	0,7832
AI2 = 0	0,9863	0,8204	0,7832
P2 = 25000	0,9876	0,8462	0,8075
EDU2 = 0; AI2 = 0; P2 = 25000	0,9873	0,4581	0,8021

Представленные результаты позволяют оценить относительную значимость рассматриваемых факторов для динамики человеческого капитала. При их изолированном изменении наибольшее замедление его накопления наблюдается при полном прекращении инвестиций в обучение. Данный результат, однако, является сценарным и определяется выбранными значениями α_2 , β_2 , интенсивности мобильности и других параметров, поэтому не должен интерпретироваться как универсальное соотношение факторов для всех предприятий. Таким образом, предложенная система ОДУ может быть использована для выявления условий деградации трудовых ресурсов и оценки чувствительности отдельных предприятий к различным управленческим решениям. Тем самым предложенный авторами алгоритм может использоваться как инструмент предварительной оценки рисков при принятии решений в области управления человеческим капиталом.

Обсуждение. В рамках настоящего исследования экономико-математическая модель воспроизводства человеческих ресурсов разработана на основе дифференциального уравнения первого порядка, что позволяет описать динамику их изменений во времени. Классические модели накопления кадрового потенциала также описываются дифференциальным уравнением, в частности, это модель Лукаса [24], учитывающая долю времени на работу и на обучение, модель Бен-Пората [25], включающая в себя инвестиции в человеческий капитал и учитывающая его амортизацию. Тем самым предлагаемая модель, с одной стороны, построена на основе устоявшихся постулатов мейнстрима, с другой стороны, она учитывает влияние технологий ИИ на кадровый потенциал и состояние конкурентной среды, что представляется актуальным в современных условиях научно-технического и социально-экономического развития. Применяемая система ОДУ обеспечивает комплексное, динамически согласованное описание динамики воспроизводства человеческого капитала предприятия под воздействием инвестиций в обучение работников, внедрения технологий ИИ и изменения конкурентной среды.

Результаты апробации разработанной модели для трех сценариев на примере трех предприятий согласуются с полученными ранее выводами других исследований. В частности, подтвердился эффект насыщения на уровне предприятия в среднесрочном периоде, отраженный в работе Ф. Майлян [26]. Результаты настоящего исследования о положительном влиянии повышения уровня оплаты труда как экзогенного фактора на развитие человеческого капитала при стимулировании обучения работников, внедрения ИИ и наличии инструментов поддержки персонала, соответствуют выводам, полученным другими авторами [27]. Также апробация представленной модели подтвердила значимость активизации обучения работников и внедрения ИИ для развития человеческих ресурсов, особенно для предприятия с изначально невысоким их уровнем [21].

В целом предлагаемая динамическая экономико-математическая модель воспроизводства человеческого капитала комплексно учитывает наиболее значимые факторы и их изменение в динамике, носит системный характер и может иметь прикладное значение в целях повышения качества управленческих решений на предприятиях.

Заключение. В статье предложен подход к моделированию воспроизводства человеческого капитала предприятия в условиях цифровой экономики, исходя из того, что компетенции работников формируются и утрачиваются во времени под совместным воздействием внутрифирменного обучения, внедрения технологий ИИ, технологически обусловленной амортизации навыков и межфирменной мобильности. В отличие от статических оценок, предложенная экономико-математическая постановка описывает динамику человеческого капитала как нелинейный процесс ограниченного роста относительно фиксированного отраслевого фронта, что обеспечивает сопоставимость фирм и отражает эффект насыщения по мере приближения к лучшим практикам.

Показано, что учет межфирменной мобильности приводит к необходимости перехода от уравнения для одной организации к системе взаимосвязанных ОДУ для набора фирм. В системной постановке конкурентная среда становится эндогенной: изменение человеческого капитала одной фирмы влияет на траектории других через параметры межфирменного взаимодействия. Для практической спецификации этих связей предложено задавать коэффициенты мобильности через дифференциацию заработной платы, что позволяет интерпретировать перетоки рабочей силы как результат конкуренции на рынке труда.

Особо подчеркивается, что калибровка параметров модели для конкурирующих предприятий ограничена доступностью данных: внутренние метрики компетенций, обучение, фактическое использование ИИ и детальная статистика кадровых переходов, как правило, не публикуются и относятся к коммерчески чувствительной информации. Следовательно, при отраслевом моделировании параметры конкурентов в большинстве случаев могут задаваться лишь сценарно, интервально или косвенно на основе открытых индикаторов, что необходимо учитывать при интерпретации результатов.

Численный эксперимент на примере трех предприятий продемонстрировал прикладную интерпретируемость модели и значимость совместного учета факторов. В базовом сценарии без межфирменных потоков динамика определяется различиями в эффективности обучения и внедрения ИИ при наличии амортизации, а темпы роста снижаются по мере приближения к фронтиру. В сценарии с повышением заработной платы на одном из предприятий ее траектория усиливается за счет межфирменного компонента, а у конкурентов темпы роста снижаются, что подтверждает роль компенсационной политики как фактора динамики компетенций. Наконец, сценарий компенсирующей стратегии показал, что усиление инвестиций в обучение и ИИ способно ускорить сближение с фронтиром и частично нивелировать неблагоприятные эффекты кадровой конкуренции.

Проведен анализ неблагоприятных управленческих решений, показавший, что изолированное сокращение инвестиций в обучение или внедрение ИИ приводит главным образом к замедлению накопления кадровых ресурсов, тогда как их сочетание со снижением конкурентоспособности на рынке труда (через ухудшение зарплатной позиции и межфирменную мобильность) способно переводить фирму в режим деградации. Таким образом, предложенная авторами модель воспроизводства человеческого капитала может использоваться не только для анализа траекторий роста, но и для выявления условий утраты кадрового потенциала и оценки управленческих рисков.

Перспективы дальнейших исследований воспроизводства человеческого капитала связаны с эмпирической валидацией модели на корпоративных панельных данных, расширением набора профессиональных групп, уточнением спецификации межфирменных потоков (включая отраслевую близость и неоднородность задач), а также разработкой процедур робастной калибровки параметров в условиях неполноты данных о конкурентах.

Список литературы / References

1. Fan Chen, Liao Xuehui, Yang Xin. Artificial Intelligence and Enterprise Total Factor Productivity: A Human Capital Requirement Perspective. *International Review of Economics & Finance*. 2025;104:104661. <https://doi.org/10.1016/j.iref.2025.104661>
2. Solow RM. We'd Better Watch out. *New York Times Book Review*. 1987;36:36. URL: <https://gwern.net/doc/economics/automation/1987-solow.pdf> (accessed: 01.07.2026).
3. Uma Maheswari Gurusamy, Meenakshi Anantharaman, Ram Prasath Selvamani, Sangeetha Vijayarajan. A Customer Lifetime Value-aware Framework for Strategic Churn Prediction Using Deep Learning. *Advanced Engineering Research (Rostov-on-Don)*. 2026;26(1):2211. <https://doi.org/10.23947/2687-1653-2026-26-1-2211>
4. Babina T, Fedyk A, He A, Hodson J. Artificial Intelligence, Firm Growth, and Product Innovation. *Journal of Financial Economics*. 2024;151:103745. <https://doi.org/10.1016/j.jfineco.2023.103745>
5. Schultz TW. *Investing in People: The Economics of Population Quality*. Berkeley: University of California Press; 1981. 173 p.
6. Romer PM. The Origins of Endogenous Growth. *Journal of Economic Perspectives*. 1994;8(1):3–22.
7. Трусов Н.В., Шананин А.А. Математическая модель динамики человеческого капитала. *Журнал вычислительной математики и математической физики*. 2023;63(10):1747–1760. <https://doi.org/10.31857/S0044466923100150>
8. Trusov NV, Shananin AA. Mathematical Model of Human Capital Dynamics. *Computational Mathematics and Mathematical Physics*. 2023;63(10):1747–1760. <https://doi.org/10.31857/S0044466923100150>
9. Mincer J. Investment in Human Capital and Personal Income Distribution. *Journal of Political Economy*. 1958;66(4):281–302. <https://doi.org/10.1086%2F258055>
9. Xie Fang, Zuo Zhigang, Zhou Jinquan. Does Technology Progress Enhance or Diminish the Return to Education? — A Theoretical Model and Empirical Evidence from China. *Cogent Education*. 2025;12(1):2581416. <https://doi.org/10.1080/2331186X.2025.2581416>
10. Birch E, Preston A. The Falling Returns to Education in Australia. *Economic Record*. 2025;101(334):377–391. <https://doi.org/10.1111/1475-4932.12878>

11. Lei Liying, Feng Hui, Ren Jingjing. Artificial Intelligence, Human Capital and Firm-Level Total Factor Productivity. *Finance Research Letters*. 2025;85(A):107897. <https://doi.org/10.1016/j.frl.2025.107897>
12. Aghion P, Akcigit U, Hyttinen A, Toivanen O. A Year Older, a Year Wiser (and Farther from Frontier): Invention Rents and Human Capital Depreciation. *The Review of Economics and Statistics*. 2024;108(4):974–982. <https://doi.org/10.3386/w29863>
13. Басханов А.Р. Анализ факторов, влияющих на отдачу от стажа работы среди выпускников магистратуры в России в 2016–2024 гг. *Экономика труда*. 2026;13(6):815–836. <https://doi.org/10.18334/et.13.6.126204>
Baskhanov AR. Factors Affecting the Wage Premium from Work Experience for Master's Graduates in Russia, 2016–2024. *Russian Journal of Labour Economics*. 2026;13(6):815–836. <https://doi.org/10.18334/et.13.6.126204>
14. Окорочков В.М., Кликунов Н.Д., Зюкин Д.В. К вопросу об амортизации человеческого капитала. *Вестник Алтайской академии экономики и права*. 2023;11:268–273. <https://doi.org/10.17513/vaael.3086>
Okorokov VM, Klikunov ND, Zyukin DV. On the Depreciation of Human Capital. *Bulletin of the Altai Academy of Economics and Law*. 2023;11:268–273. <https://doi.org/10.17513/vaael.3086>
15. Noy Shakked, Zhang Whitney. Experimental Evidence on the Productivity Effects of Generative Artificial Intelligence. *Science*. 2023;381(6654):187–192. <https://doi.org/10.1126/science.adh2586>
16. Kernan Freire S, He T, Wang C, Niforatos E, Bozzon A. Factory Operators' Perspectives on Cognitive Assistants for Knowledge Sharing: Challenges, Risks, and Impact on Work. *Behaviour & Information Technology*. 2026;45(10):2248–2275. <https://doi.org/10.1080/0144929X.2025.2574373>
17. Minjong Jun, Eckardt R. Training and Employee Turnover: A Social Exchange Perspective. *BRQ Business Research Quarterly*. 2023;28(1):304–323. <https://doi.org/10.1177/23409444231184482>
18. Abolhassani M. Productivity Spillovers of Superior Firms Through Worker Mobility. *De Economist*. 2024;172:1–23 <https://doi.org/10.1007/s10645-023-09431-1>
19. Abraham KG, Mallatt J. Measuring Human Capital. *Journal of Economic Perspectives*. 2022;36(3):103–130. <https://doi.org/10.1257/jep.36.3.103>
20. Bartelsman EJ, Dobbelaere S, Peters B. Allocation of Human Capital and Innovation at the Frontier: Firm-Level Evidence on Germany and the Netherlands. *Industrial and Corporate Change*. 2015;24(5):875–949. <https://doi.org/10.1093/icc/dtu038>
21. Brynjolfsson E, Li D, Raymond L. *Generative AI at Work*. Cambridge, MA: NBER, 2023. 67 p. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2304.11771>
22. Becker GS. *Human Capital: A Theoretical and Empirical Analysis, with Special Reference to Education*. Cambridge, MA: NBER, 1975. 230 p. URL: <http://www.nber.org/books/beck75-1> (дата обращения: 01.07.2026).
23. Сухинов А.И. Об аналитическом решении для модели рекламы двух конкурирующих фирм. *Computational Mathematics and Information Technologies*. 2023;6(1):22–26. <https://doi.org/10.23947/2587-8999-2023-6-1-22-26>
Sukhinov AI. About the Analytical Solution for the Advertising Model of Two Competing Firms. *Computational Mathematics and Information Technologies*. 2023;6(1):22–26. <https://doi.org/10.23947/2587-8999-2023-6-1-22-26>
24. Lucas ER Jr. On the Mechanics of Economic Development. *Journal of Monetary Economics*. 1988;22(1):3–42. [https://doi.org/10.1016/0304-3932\(88\)90168-7](https://doi.org/10.1016/0304-3932(88)90168-7)
25. Ben-Porath Y. The Production of Human Capital and the Life Cycle of Earnings. *Journal of Political Economy*. 1967;75(4–1):352–365.
26. Mayilyan F. Human Capital and the Phenomenon of Increasing Returns in Economic Growth Models. *Bulletin of Yerevan University G: Economics*. 2025;16(2):5–17. <https://doi.org/10.46991/BYSU.G.2025.16.2.005>
27. Hansen H, Kanay De S, Rand J, Trifković N. Wage Returns to Workplace Training in Myanmar. *Development Policy Review*. 2023;41(2):e12658. <https://doi.org/10.1111/dpr.12658>

Об авторах:

Александр Иванович Сухинов, член-корреспондент РАН, доктор физико-математических наук, профессор, заведующий кафедрой «Математика и информатика» Донского государственного технического университета (344003, Российская Федерация, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), [SPIN-код](#), [ORCID](#), [ScopusID](#), [ResearcherID](#), [ResearchGate](#), sukhinov@gmail.com

Кирилл Антонович Харитонов, аспирант кафедры «Математика и информатика» Донского государственного технического университета (344003, Российская Федерация, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), [SPIN-код](#), plxlhuawei@gmail.com

Екатерина Александровна Угнич, кандидат экономических наук, доцент кафедры «Международная экономика и бизнес» Донского государственного технического университета (344003, Российская Федерация, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), [SPIN-код](#), [ORCID](#), [ScopusID](#), [ResearcherID](#), [ResearchGate](#), ugnich77@mail.ru

Заявленный вклад авторов:

А.И. Сухинов: разработка концепции, курирование данных, разработка методологии, научное руководство, валидация результатов, написание рукописи – внесение замечаний и исправлений.

К.А. Харитонов: формальный анализ, проведение исследования, визуализация, написание черновика рукописи.

Е.А. Угнич: разработка методологии, проведение исследования, получение финансирования, написание рукописи – внесение замечаний и исправлений, административное руководство исследовательским проектом.

Сухинов А.И. является членом редакционной коллегии журнала Advanced Engineering Research с 2022 г., но не имеет никакого отношения к решению опубликовать эту статью. Статья прошла принятую в журнале процедуру рецензирования. Об иных конфликтах интересов авторы не заявляли.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Декларация ИИ: авторы заявляют, что при подготовке текста рукописи не использовались технологии генеративного искусственного интеллекта (ИИ), ИИ не является соавтором публикации: авторство присвоено только физическим лицам, внёсшим существенный интеллектуальный вклад в исследование.

About the Authors:

Alexander I. Sukhinov, Corresponding Member of RAS, Dr.Sci. (Phys.-Math), Professor, Head of the Department of Mathematics and Informatics, Don State Technical University (1, Gagarin Sq., Rostov-on-Don, 344003 Russian Federation), [SPIN-code](#), [ORCID](#), [ScopusID](#), [ResearcherID](#), [ResearchGate](#), sukhinov@gmail.com

Kirill A. Kharitonov, Postgraduate student of the Department of Mathematics and Informatics, Don State Technical University (1, Gagarin Sq., Rostov-on-Don, 344003, Russian Federation), [SPIN-code](#), plxlhuawei@gmail.com

Ekaterina A. Ugnich, Cand.Sci. (Economics), Associate Professor of the Department of International Economics and Business, Don State Technical University (1, Gagarin Sq., Rostov-on-Don, 344003, Russian Federation), [SPIN-code](#), [ORCID](#), [ScopusID](#), [ResearcherID](#), [ResearchGate](#), ugnich77@mail.ru

Claimed Contributorship:

AI Sukhinov: conceptualization, data curation, methodology, supervision, validation, writing – review & editing.

KA Kharitonov: formal analysis, investigation, visualization, writing – original draft preparation.

EA Ugnich: methodology, investigation, funding acquisition, writing – review & editing, project administration.

AI Sukhinov has been a member of the editorial board of the journal “Advanced Engineering Research” since 2022 but had no involvement in the decision to publish this article. The article underwent the standard peer-review process of the journal. The authors declared no other conflicts of interest.

All authors read and approved the final manuscript.

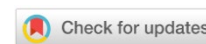
AI Declaration: the authors declare that no generative artificial intelligence (AI) technologies were used in the preparation of the manuscript text and AI is not a co-author of the publication; authorship is attributed solely to individuals who made a substantial intellectual contribution to the research.

Поступила в редакцию / Received 03.08.2026

Поступила после рецензирования / Reviewed 25.08.2026

Принята к публикации / Accepted 10.09.2026

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



УДК 004.896:004.032.26

Оригинальное эмпирическое исследование

<https://doi.org/10.23947/2687-1653-2026-26-3-2619>

Интеллектуальная модель прогнозирования технологических нарушений электролиза алюминия типа «конус» на основе методов ансамблевого обучения

А.С. Михалев , Т.Г. Пенькова ✉, Л.Ф. Ноженкова

Институт вычислительного моделирования Сибирского отделения

Российской академии наук, г. Красноярск, Российская Федерация, <https://ror.org/047f8bv22>✉ penkova_t@icm.krasn.ru

EDN: QSBFGG

Аннотация

Введение. Обеспечение высоких технико-экономических показателей выпуска алюминия — актуальная производственная задача. Использование искусственного интеллекта позволяет ограничить влияние таких технологических нарушений, как деформация подошвы анода с формированием конусов. Достаточно хорошо изучены причины и последствия образования конусов. Названы десятки параметров, которые сигнализируют о нарушении. Однако известные решения фиксируют уже возникшие отклонения или предсказывают смежные состояния. Производственные реалии требуют адекватного заблаговременного уведомления о проблеме. Цель представленной работы — создание и апробация интеллектуальной модели для раннего прогнозирования нарушений типа «конус» при производстве алюминия.

Материалы и методы. Исследовались более 70 технологических параметров, данные среднесуточного мониторинга восьми электролизеров опытного участка (2020–2025 гг.). Положительный класс сформирован по предаварийному интервалу 72–24 ч до регистрации нарушения. Для прогнозирования применялись ансамблевые методы: — градиентный бустинг (XGBoost, CatBoost, LightGBM); — автоматизированный конвейер FEDOT; — нейросетевые ансамбли (RTDL-RM, RTDL-NE, TabM).

Метрики качества: Accuracy, Precision, Recall, F1.

Результаты исследования. Оптимальной признана модель LightGBM: Accuracy — 0,88; Recall — 0,79; F1 — 0,79. В категории событий без нарушений она корректно классифицировала состояние «норма» в 95 % случаев (900 наблюдений). В 5 % случаев (46 наблюдений) ошибочно распознано «нарушение». В категории событий с нарушениями верно распознаны 62,5 % состояний (10 наблюдений), в 37,5 % случаев (6 наблюдений) нарушения пропущены. Апробация на данных реального технологического процесса доказала способность модели выявлять конусы за 24–72 ч до фактической регистрации. При апробации зарегистрировано шесть событий обнаружения конуса, модель выявила признаки развития нарушения для пяти (83,3 %).

Обсуждение. Результаты согласуются с физико-технологическими особенностями возникновения конуса. Предложенное решение дополняет методы локального контроля анодов и электролизеров благодаря анализу параметров среднесуточного мониторинга. Апробация подтвердила известные проблемы прогностических моделей в условиях промышленного электролиза: сложность регистрации событий, дисбаланс классов, изменение характеристик. Данных мониторинга восьми электролизеров опытного участка недостаточно, и для подтверждения универсальности модели нужна дополнительная проверка — с другой продолжительностью, на других участках.

Заключение. Подтвердилось способность модели прогнозировать нарушение за 24–72 часа до регистрации конуса и ее достаточная эффективность при ограничениях, обусловленных объемом выборки и изменчивостью технологических условий. Дальнейшие исследования предполагают аугментацию данных, проверку модели на других участках производства, комплексный анализ параметров среднесуточного и мгновенного мониторинга для локализации нарушения.

Ключевые слова: технологические нарушения при производстве алюминия, прогнозирование нарушений типа «конус», модель LightGBM, деформация подошвы анода, контроль анодов и электролизеров

Благодарности. Авторы выражают благодарность ведущим специалистам автоматизации производства ООО «РУСАЛ Инженерно-технологический центр» за экспертную оценку и возможность апробации моделей.

Финансирование. Работа выполнена в рамках проекта «Математическое и информационное моделирование сложных физических и производственных процессов и систем» (код (шифр) проекта FWES-2024-0013) из государственного задания ИВМ СО РАН — обособленного подразделения ФИЦ КИЦ СО РАН (номер государственного учета НИР 124012900550-1), <https://gisnauka.ru/nioctr/detail/B5CV3ILS5GQHT0KT8Y7VHDA6>

Для цитирования. Михалев А.С., Пенькова Т.Г., Ноженкова Л.Ф. Интеллектуальная модель прогнозирования технологических нарушений электролиза алюминия типа «конус» на основе методов ансамблевого обучения. *Advanced Engineering Research (Rostov-on-Don)*. 2026;26(3):2619. <https://doi.org/10.23947/2687-1653-2026-26-3-2619>

Original Empirical Research

An Intelligent Model for Predicting Spike Type Technological Process Disturbances in Aluminum Electrolysis Based on Ensemble Learning Technologies

Anton S. Mikhalev , Tatiana G. Penkova ✉, Ludmila F. Nozhenkova 

Institute of Computational Modelling of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Krasnoyarsk, Russian Federation, <https://ror.org/047f8bv22>

✉ penkova_t@icm.krasn.ru

Abstract

Introduction. Maintaining high technical and economic performance in aluminum production is a pressing operational challenge. The use of artificial intelligence makes it possible to mitigate the impact of process irregularities such as the deformation of the anode bottom resulting in spike formation. The causes and consequences of spike formation have been thoroughly studied. Dozens of parameters signaling this disturbance are identified. However, existing solutions typically detect deviations only after they have occurred or predict related states. Industrial realities demand adequate, advance warning of the problem. The objective of this study is to develop and validate an intelligent model for the early prediction of spike type disturbances under aluminum production.

Materials and Methods. The study has analyzed over 70 process parameters based on average daily monitoring data from eight electrolyzers at a pilot site (2020–2025). The positive class was defined based on the pre-failure interval spanning 72 to 24 hours prior to the recorded disturbance. Ensemble methods were used for prediction:

- gradient boosting (XGBoost, CatBoost, LightGBM);
- FEDOT automated pipeline;
- neural network ensembles (RTDL-RM, RTDL-NE, TabM).

Quality metrics: Accuracy, Precision, Recall, F1.

Results. The LightGBM model was identified as optimal, with the following metrics: Accuracy — 0.88; Recall — 0.79; F1 — 0.79. For events without disturbances, it correctly classified the “normal” state in 95% of cases (900 observations), while incorrectly identifying “disturbance” in 5% of cases (46 observations). For events involving disturbances, 62.5% of states were correctly identified (10 observations), whereas disturbances were missed in 37.5% of cases (6 observations). Validation using data from an actual technological process showed the model ability to detect spikes 24–72 hours prior to their actual registration. During the validation, six spike formation events were recorded, and the model detected signs of the developing disturbance in five of them (83.3%).

Discussion. The research results are consistent with the physical and technological characteristics of spike formation. The proposed solution complements existing methods for the local monitoring of anodes and electrolyzers through analyzing parameters derived from daily monitoring data. Validation confirms known challenges for predictive models in industrial electrolysis: difficulty in event detection, class imbalance, and changing process characteristics. The monitoring data from eight electrolyzers at the pilot site are insufficient. Further testing is required to confirm the model generalizability — over longer periods and at other sites.

Conclusion. The ability of the model to predict a disturbance 24–72 hours prior to the detection of a spike formation was confirmed, as was its sufficient effectiveness given the constraints imposed by sample size and the variability of process

conditions. Future research will involve data augmentation, model validation at other production sites, and a comprehensive analysis of average daily and instantaneous monitoring parameters to localize the disturbance.

Keywords: process disturbances in aluminum production, prediction of spike defects, LightGBM model, anode bottom deformation, monitoring of anodes and electrolyzers

Acknowledgements. The authors would like to thank the lead technicians of production automation at RUSAL Engineering and Technology Center LLC for their expert assessment and the opportunity to test the developed models.

Funding Information. The research was done within the framework of the project “Mathematical and information modeling of complex physical and industrial processes and systems” (FWES-2024-0013 project code) from the state assignment of the Institute of Computational Modelling, the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (124012900550-1 state registration number of the R&D project), <https://gisnauka.ru/nioctr/detail/B5CV3ILS5GQHT0KT8Y7VHDA6>

For Citation. Mikhalev AS, Penkova TG, Nozhenkova LF. An Intelligent Model for Predicting Spike Type Technological Process Disturbances in Aluminum Electrolysis Based on Ensemble Learning Technologies. *Advanced Engineering Research (Rostov-on-Don)*. 2026;26(3):2619. <https://doi.org/10.23947/2687-1653-2026-26-3-2619>

Введение. Развитие алюминиевой промышленности требует наращивания объемов производства первичного алюминия [1]. Для достижения высоких технико-экономических показателей необходимы передовые методы управления сложными технологическими процессами. Их задача — обеспечить своевременную оценку состояния всего производственного комплекса [2] и его элементов [3]. Основные сдерживающие факторы — технологические нарушения, возникающие в процессе электролиза [4], в том числе деформация подошвы анода с формированием характерных выступов, так называемых «конусов» [5] (рис. 1).



Рис. 1. Деформация поверхности анода:
а — типичный конус; б — конус «отставание»

Возможные причины образования конусов:

- неоднородность структуры и состава угольного анода;
- нарушение технологического регламента при установке или замене анода [6];
- изменения технологических условий процесса электролиза, связанные с нарушением теплового баланса и концентрацией глинозема [7].

Нарушение ведет к изменению анодно-катодного расстояния и токораспределения в электролизере. Соответственно, образование конуса может стать причиной короткого замыкания анода и катода, роста флуктуаций тока, интенсивного пенообразования, повышения уровня шумов [8].

Проблему образования конусов следует признать системной, существенно влияющей на технологические и энергетические показатели электролиза. Развитие конуса приводит к резкому перераспределению тока, локальным перегревам, коротким замыканиям и снижению выхода по току, которое при массовом развитии нарушений может достигать нескольких процентов. Даже небольшое снижение частоты таких событий в промышленном масштабе может существенно увеличить энергоэффективность, стабильность процесса и объем выпуска алюминия.

Исследования значений технологических параметров в различных режимах работы при производстве алюминия показали, что образование конусов сопровождается экстремальными значениями десятка параметров [9]. Из-за жестких условий и сложности технологического процесса своевременная диагностика данного нарушения крайне затруднена, и отклонение выявляется на критической стадии. Кроме того, автоматизацию существенно осложняют многочисленные взаимозависимые параметры, ручные методы измерения и инерционность процесса. В этих условиях особую значимость приобретает анализ накопленных данных для выявления косвенных признаков развития нарушения. Благодаря интеллектуальным методам и технологиям обработки больших данных

можно извлекать нетривиальные, ранее неизвестные и поддающиеся интерпретации знания. Такой подход позволяет объяснять снижение производительности, своевременно обнаруживать и прогнозировать отклонения в технологическом процессе [10].

Методы машинного обучения стали одним из основных инструментов анализа [11], оптимизации производственных процессов [12] и широко применяются для задач диагностики технологических нарушений в алюминиевой промышленности [13]:

- восстановление значений трудноизмеримых параметров;
- поиск зависимостей между показателями работы промышленных электролизеров и прогнозирования вероятности изменения их технологического состояния.

Особое внимание уделяется виртуальному измерению важнейших для технологии электролиза параметров, которые сложно или невозможно напрямую контролировать в реальном времени:

- концентрация глинозема;
- температура расплава;
- анодно-катодное расстояние [14].

Такие модели решают задачу оценки текущего состояния технологии, но не позволяют заблаговременно выявить момент формирования нарушений.

Отдельное направление исследований связано с прогнозированием технологических нарушений и нештатных режимов. Статистический анализ производственных данных, экспертные знания и интеллектуальные модели стали базой для обзора методов обнаружения неисправностей и технологических отклонений в работе алюминиевых электролизеров [15]. Основная задача изысканий в этой сфере — идентификация отклонений. Отметим, что прогнозирование конкретного нарушения требует анализа его предшествующей динамики. Сложность диагностики обусловлена многомерностью процесса электролиза, взаимным влиянием технологических параметров и изменчивостью условий эксплуатации.

Для обнаружения анодов с развивающимся конусом в [16] предложен анализ анодных токов методами машинного обучения. Решение позволяет выявлять значительную часть нарушений за несколько суток до того, как признаки конуса становятся очевидными для технологического персонала. Анодные токи обеспечивают высокую чувствительность к локальным изменениям конкретного анода, однако такой подход требует соответствующей системы измерения индивидуальных токов и анализа локальных электрических характеристик.

В [17] предложена промышленная модель прогнозирования конусов с помощью скрытых моделей Маркова. Авторы выделяют характерные для данной задачи проблемы:

- дисбаланс классов;
- сложность достоверной регистрации событий;
- взаимная корреляция технологических параметров;
- изменение статистических характеристик данных при изменении режимов работы электролизеров.

Полученные результаты демонстрируют возможность прогнозирования конусов средствами машинного обучения. При этом необходимо повышать устойчивость моделей к изменению технологических режимов, сокращать количество ложных срабатываний и учитывать динамику производственных параметров.

Известные решения главным образом фиксируют уже возникшие отклонения или прогнозируют смежные состояния. Пока недостаточно внимания уделяется построению интеллектуальных моделей раннего прогнозирования нарушений. Есть определенные успехи в прогнозировании нарушений с четко выраженными изменениями отдельных технологических параметров [18]. Это, например, анодный эффект [19], нарушение концентрации глинозема, различные проблемы механической и электрической неисправности [20]. Однако нерешенной остается задача раннего прогнозирования конусов. Здесь необходим комплексный анализ многомерных данных мониторинга, который по доступным технологическим параметрам выявляет скрытые закономерности возникновения и развития такого нарушения. Помимо высокой точности прогнозирования с учетом особенностей производственного объекта необходима интерпретируемость прогностической модели. Для ее применения в промышленных условиях недостаточно классифицировать состояние электролизера. Важно определить, какие технологические параметры вносят наибольший вклад в прогноз, какие признаки предвещают нарушения и насколько полученные зависимости согласуются с физико-технологической природой процесса. Требуются модели для анализа значимости признаков и выявления аномальных паттернов.

Цель представленной работы — создание интеллектуальной модели для раннего прогнозирования технологических нарушений типа «конус» при производстве алюминия. Предложенная модель базируется на комплексном анализе технологических параметров с применением методов ансамблевого обучения. Для достижения цели решаются три задачи.

1. Формирование и предварительная обработка массива технологических данных для применения методов машинного обучения.

2. Разработка интеллектуальной прогностической модели в виде ансамбля моделей бинарной классификации, позволяющих по новым значениям технологических параметров определять состояние объекта: «норма» или «нарушение».

3. Апробация модели по реальным данным мониторинга на опытном участке производства алюминия.

Материалы и методы. В 2020–2025 гг. проводился мониторинг на опытном участке комплекса производства алюминия. Отслеживалась работа восьми электролизеров с обожженными анодами технологии РА-550. Данные контроля и автоматизированной системы управления технологическим процессом предоставили для анализа более 70 параметров, которые характеризуют работу отдельных единиц (электролизеров, корпусов) в различных режимах функционирования. Назовем некоторые из этих индикаторов: уровень металла, уровень электролита, температура электролита, длительность выливки металла, параметры химического состава электролита, параметры системы подачи глинозема и фтористого алюминия, режимы питания, параметры регулирования межполюсного расстояния между металлом и подошвой углеродного анода, параметры напряжения, тока, шума, характеристики зарегистрированных технологических нарушений, показатели срока службы электролизеров и технологических операций.

Для формализации построения модели прогнозирования определили последовательность этапов обработки и анализа данных (рис. 2).

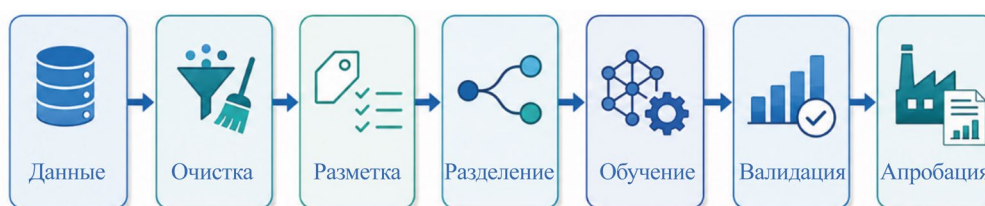


Рис. 2. Схема построения интеллектуальной модели прогнозирования нарушения типа «конус»

На начальном этапе формируется массив данных производственного мониторинга. Далее они очищаются и предварительно обрабатываются: устраняются пропуски, проверяется корректность записей, готовится признаковое пространство. После этого проводится разметка наблюдений по классам «норма» и «нарушение». Результаты машинного обучения во многом зависят от качества и полноты входных данных, корректности их разметки: чем полнее и точнее исходная информация, тем выше достоверность прогнозов. Затем данные разделяются на обучающую, валидационную и тестовую выборки с учетом временной структуры процесса. Для технологического процесса характерны выраженная временная зависимость, инерционность и повторяемость состояний в смежные периоды. В связи с этим целесообразно использовать временное разделение, при котором обучение выполняется на более ранних наблюдениях, а проверка — на последующих. Такой подход позволяет оценить способность модели не просто воспроизводить известные закономерности, но и прогнозировать развитие технологического нарушения в условиях, приближенных к реальным. На следующем этапе обучается и настраивается прогностическая модель, подбираются оптимальные параметры. Далее — валидация и сравнительная оценка результатов прогнозирования по выбранным метрикам качества. Заключительный этап предполагает апробацию модели. Это проверка ее способности заблаговременно прогнозировать конус на реальных технологических данных.

Конус может формироваться довольно быстро: с момента появления дефекта до замыкания анода с катодом иногда проходит около трех суток [21]. Рост напряжения и шумов тока отмечается уже на 2–3-й день [22]. В связи с этим трехдневный интервал, предшествующий регистрации нарушения, рассматривается в данной работе как значимый предаварийный период для анализа параметров мониторинга и построения модели раннего прогнозирования.

При формировании обучающей выборки учитывался день фактической регистрации нарушения, т.е. день, когда конус обнаруживался при визуальном осмотре анода, извлеченного из электролизера. Данные в день регистрации нарушения исключались из обучающей выборки. Для каждого события, зарегистрированного в момент T , к положительному классу относились наблюдения, попадающие в предаварийный интервал от $T-72$ ч до $T-24$ ч включительно.

На этапе предварительной обработки мониторинговых данных пропущенные значения восстанавливались с помощью алгоритма множественной итеративной импутации (multiple imputation by chained equations, MICE) [23]. Каждый параметр, содержащий пропущенные значения, поочередно рассматривался как целевая переменная, а остальные выступали в роли признаков. В качестве базовой модели, применяемой для оценки пропусков, используется Bayesian Ridge регрессия. Перед запуском итераций начальные значения пропусков заполняются медианой соответствующего признака. Далее параметры с пропущенными значениями последовательно обрабатываются: модель обучается на наблюдениях с известными значениями, после чего используется для прогнозирования пропусков в соответствующих записях.

Для построения интеллектуальной прогностической модели исследовались две группы методов: ансамбли на основе деревьев решений и ансамбли нейронных сетей. Ансамблевые методы основаны на объединении нескольких базовых моделей, что позволяет повысить точность и устойчивость прогнозирования. В данной работе для прогнозирования нарушений выбраны следующие реализации градиентного бустинга над деревьями решений [24]: XGBoost, CatBoost и LightGBM. Указанные алгоритмы относятся к классу индустриальных. Они используются для работы с разнородными признаковыми пространствами и демонстрируют устойчивые результаты в задачах классификации. Алгоритм XGBoost (extreme gradient boosting) представляет собой оптимизированную реализацию градиентного бустинга, в которой минимизация функции потерь сочетается с регуляризацией сложности модели. Такой подход направлен на повышение обобщающей способности алгоритма и снижение риска переобучения. Особенность алгоритма CatBoost (categorical boosting) — специальная схема обработки категориальных переменных и построения последовательных оценок, уменьшающая вероятность появления смещений, связанных с кодированием признаков. Алгоритм LightGBM (light gradient-boosting machine) ориентирован на эффективную обработку больших массивов данных и обеспечивает высокую скорость обучения при сохранении приемлемой точности. Наряду с отдельными алгоритмами градиентного бустинга в работе применяется библиотека FEDOT. Она использует эволюционные методы и предназначена для автоматизированного построения составных конвейеров машинного обучения. С помощью библиотеки выполняется поиск структуры модели, подбираются способы предварительной обработки и объединения результатов. При этом можно исследовать не только заранее заданные модели, но и автоматически сформированные комбинации методов, а также сопоставить их качество в одинаковых условиях обучения и тестирования.

В дополнение к ансамблевым алгоритмам на основе деревьев решений исследуются подходы глубокого обучения, основанные на ансамблях нейронных сетей [25]: RTDL-RM, RTDL-NE, TabM. Подход RTDL-RM (RTDL-revisiting-models) предполагает применение стандартных архитектур нейронных сетей для табличных данных. Можно достичь высокой производительности благодаря ансамблированию, настройке функций активации, нормализации и регуляризации. При модификации RTDL-NE (RTDL-num-embeddings) применяются специальные представления числовых признаков. Каждый числовой параметр преобразуется в вектор. Эмбединг позволяет моделям более эффективно учитывать сложные нелинейные зависимости между признаками и целевой переменной. Подход TabM реализует объединение нескольких моделей-экспертов, совместно формирующих итоговый прогноз. Для уменьшения вычислительной сложности используются общие параметры и отдельные низкоранговые адаптеры, построенные по принципу LoRA (low-rank adaptation). Это позволяет увеличить число моделей в ансамбле без значительного роста количества обучаемых параметров.

Наиболее эффективные алгоритмы и оптимальные параметры настройки интеллектуальных моделей выбираются на основе метрик оценки качества классификации: достоверность (accuracy), точность (precision), полнота (recall) и F1-мера (F1-score) [26].

Для построения и оценки интеллектуальных моделей исходный набор данных среднесуточного мониторинга разделен с учетом временной структуры производственного процесса (рис. 3).

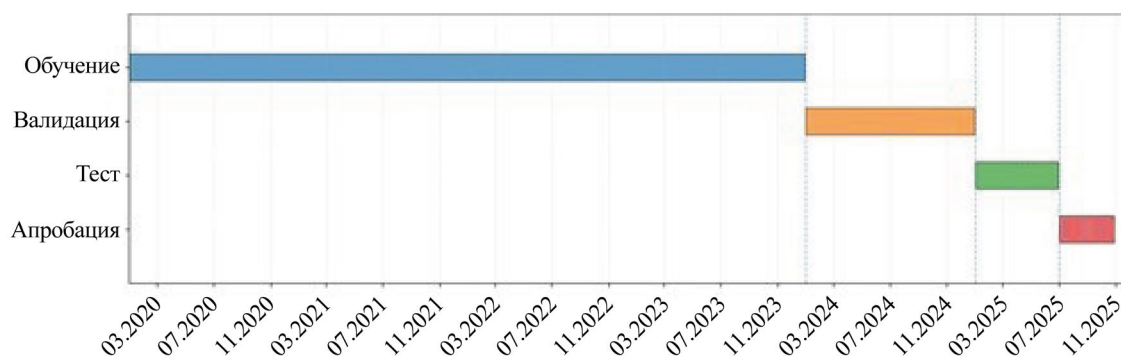


Рис. 3. Схема временного разбиения данных на обучающую, валидационную, тестовую выборки и апробацию

В качестве обучающей выборки используются данные с 01.01.2020 по 31.12.2023 (17768 записей). Валидационная выборка сформирована по данным с 01.01.2024 по 31.12.2024 (2230 записей). Тестовая включает данные с 01.01.2025 по 30.06.2025 (1342 записи). Дополнительно для проверки работоспособности прогностической модели выделен апробационный период — с 01.07.2025 по 28.10.2025 (962 записи).

Такое временное разделение позволяет снизить риск утечки информации между выборками и оценить способность модели прогнозировать нарушение на данных, не участвовавших в обучении и настройке. Обучающая выборка предназначена для построения моделей, валидационная — для подбора гиперпараметров и выбора порога классификации, тестовая — для независимого сравнения качества алгоритмов, апробационная — для проверки модели в условиях, приближенных к промышленной эксплуатации.

В таблице 1 представлено распределение записей по классам «норма» и «нарушение» для каждой выборки.

Таблица 1

Распределение наблюдений по классам в выборках

Класс	Обучение	Валидация	Тестирование	Апробация
Норма	16429	1902	1234	946
Нарушение	1339	328	108	16

Очевиден дисбаланс: число примеров нормального режима работы электролизеров значительно превышает количество случаев предаварийного состояния, предшествующего обнаружению конуса. Такое распределение влияет на обучение и оценку моделей. Распознавание преобладающего класса дает высокую точность, при этом плохо выявляются редкие предаварийные состояния.

Для компенсации дисбаланса в работе применяются весовые коэффициенты классов, позволяющие увеличить вклад ошибок на объектах положительного класса в функцию потерь и снизить смещение модели в сторону нормального режима. Качество моделей оценивается по метрикам Precision, Recall и F1-score, которые в условиях редкого целевого события значительно информативнее Accuracy.

Вычисления выполнялись на рабочей станции под управлением операционной системы Windows 11, оснащенной графическим процессором GeForce RTX 4080, 12 Гб. Программная реализация выполнена на языке Python 3.13 в среде разработки PyCharm. Для обработки и анализа данных использовались библиотеки NumPy, pandas, scikit-learn. Модели градиентного бустинга реализованы с помощью библиотек XGBoost, CatBoost, LightGBM. Автоматизированное построение моделей выполнялось средствами библиотеки FEDOT. Нейросетевые модели реализованы с использованием PyTorch, RTDL, TabM. Во всех вычислениях, содержащих стохастические операции, использовалось фиксированное значение генератора псевдослучайных чисел.

Результаты исследования. Вычислительные эксперименты позволили выбрать параметры, обеспечивающие максимальные значения метрик оценки качества. Эти данные стали базой для разработки интеллектуальной прогностической модели. Гиперпараметры с диапазонами и оптимальными значениями для каждого типа модели приводятся в таблицах 2–4.

Таблица 2

Гиперпараметры бустинг-модели XGBoost

№	Гиперпараметр	Диапазон	Значение
1	Estimators (количество деревьев)	[50, 5000]	4500
2	Max depth (максимальная глубина дерева)	[3, 25]	18
3	Learning rate (шаг обучения)	[1e-5, 1]	0,008
4	Subsample (доля выборки)	[0,5, 1]	0,701
5	Col sample by level (доля признаков на уровень)	[0,5, 1]	0,623
6	Col sample by tree (доля признаков на дерево)	[0,5, 1]	0,714
7	Alpha (альфа — коэффициент L1-регуляризации)	[1e-8, 10]	3,302
8	Lambda (лямбда — коэффициент L2-регуляризации)	[1e-8, 10]	8,654
9	Gamma (гамма — порог разделения)	[1e-8, 10]	0,067

Таблица 3

Гиперпараметры бустинг-модели CatBoost

№	Гиперпараметр	Диапазон	Значение
1	Learning rate (шаг обучения)	[1e-5, 1]	0,031
2	Depth (глубина дерева)	[3, 16]	10
3	RSM (доля случайно выбираемых признаков)	[0,5, 1]	0,752
4	L2 leaf reg (коэффициент L2-регуляризации)	[1, 10]	2,511
5	Leaf estimation iterations (число итераций оценки листьев)	[1, 10]	1

Таблица 4

Гиперпараметры бустинг-модели LightGBM

№	Гиперпараметр	Диапазон	Значение
1	Estimators (количество деревьев)	[50, 5000]	4000
2	Max depth (максимальная глубина дерева)	[3, 10]	10
3	Learning rate (шаг обучения)	[1e-5, 1]	0,011
4	Num leaves (количество листьев)	[1, 100]	75
5	Feature fraction (доля признаков)	[0.5, 1]	0,561
6	Min data in leaf (минимальное количество данных в листе)	[10, 500]	25
7	Min child weight (минимальный вес разбиения)	[1e-3, 50]	0,038
8	Reg lambda1 (коэффициент L1-регуляризации)	[1e-8, 10]	0,452
9	Reg lambda2 (коэффициент L2-регуляризации)	[1e-8, 10]	7,022

С помощью конвейера FEDOT определена структура алгоритма, включающего модели машинного обучения XGBoost, «Случайный лес» и «Логистическая регрессия». Для модели «Случайный лес» определены гиперпараметры:

- критерий разбиения узлов (criterion) — «энтропийный»;
- доля признаков, случайно выбираемых при построении каждого дерева (max_features) — 0,302;
- минимальное количество объектов для разделения внутреннего узла (min_samples_split) — 6;
- минимальное количество объектов в листовом узле (min_samples_leaf) — 2;
- использование бутстрэп-выборки при построении деревьев (bootstrap) — true.

Для модели XGBoost определены гиперпараметры:

- тип базовой модели бустинга (booster) — gbm;
- метод построения деревьев (tree_method) — auto;
- использование категориальных признаков (enable_categorical) — true;
- использование валидационной выборки при обучении (use_eval_set) — true;
- ранняя остановка (early_stopping_rounds) — 30.

Для модели «Логистическая регрессия» использовалась конфигурация по умолчанию. Дополнительно применялись нормализация стандартным масштабированием (StandardScaler) и ресемплинг данных с параметрами по умолчанию.

В таблице 5 представлены результаты оценки качества прогностических моделей для рассматриваемых архитектур на тестовой выборке. Для нее взяли данные мониторинга работы опытного участка. В квадратных скобках приводятся 95-процентные доверительные интервалы, рассчитанные бутстрэп-методом на тестовой выборке. Интервалы позволяют сравнивать модели не только по точечным оценкам метрик, но и по устойчивости полученных результатов.

Таблица 5

Результаты оценки качества прогностических моделей

Модель	Метрики оценки качества							
	Accuracy		Precision		Recall		F1	
XGBoost	0,87	[0,85; 0,89]	0,78	[0,72; 0,83]	0,69	[0,62; 0,75]	0,72	[0,66; 0,77]
CatBoost	0,87	[0,85; 0,90]	0,77	[0,71; 0,82]	0,76	[0,70; 0,82]	0,77	[0,72; 0,82]
LightGBM	0,88	[0,86; 0,90]	0,78	[0,73; 0,84]	0,79	[0,73; 0,85]	0,79	[0,74; 0,84]
FEDOT	0,87	[0,84; 0,89]	0,80	[0,74; 0,86]	0,74	[0,68; 0,80]	0,77	[0,71; 0,82]
RTDL-RM	0,86	[0,84; 0,88]	0,76	[0,70; 0,82]	0,76	[0,69; 0,82]	0,76	[0,70; 0,81]
RTDL-NE	0,86	[0,84; 0,89]	0,76	[0,71; 0,82]	0,78	[0,72; 0,84]	0,77	[0,71; 0,82]
TabM	0,84	[0,82; 0,87]	0,74	[0,68; 0,80]	0,78	[0,71; 0,84]	0,76	[0,70; 0,81]

Анализ данных таблицы 5 позволяет судить об эффективности моделей для исследуемых данных.

LightGBM демонстрирует наилучшую общую производительность среди всех исследуемых алгоритмов, лидируя по метрикам Accuracy (0,88), Recall (0,79) и F1 (0,79). Высокие значения меры параметра Recall указывают на способность эффективно выявлять нарушения (низкий уровень ложноотрицательных событий), что крайне важно для раннего оповещения.

XGBoost и CatBoost показывают сопоставимый уровень — Accuracy (0,87). Тем не менее по метрикам Recall (0,76 против 0,69) и F1 (0,77 против 0,72) CatBoost заметно опережает XGBoost. Это говорит о том, что CatBoost надежнее выявляет нарушения, а XGBoost чаще их пропускает.

Алгоритм, автоматически построенный с помощью библиотеки FEDOT, демонстрирует точность Accuracy 0,87. Этот результат сопоставим с LightGBM. К тому же значение Precision (0,80) — наилучшее среди всех рассмотренных моделей, т.е. в данном случае фиксируется меньше всего ложных срабатываний. Это определяет доверие к выдаваемым прогнозам и снижает нагрузку на персонал, вынужденный реагировать на ложные события. По F1-мере (0,77) алгоритм выходит на один уровень с CatBoost.

Нейросетевые модели в виде ансамблей также показали конкурентоспособные результаты. В этой группе RTDL-NE демонстрирует лучшую F1-меру (0,77) и высокий Recall (0,78), что подчеркивает значимость качественного кодирования числовых признаков при работе с табличными данными. У TabM при высоком Recall (0,78) самый низкий уровень Accuracy (0,84) и Precision (0,74). Скорее всего, это связано с особенностями его архитектуры — parameter-efficient ensembling, требующей дополнительной настройки для исходного набора данных.

Таким образом, модель архитектуры LightGBM оптимальна для прогнозирования технологических нарушений типа «конус» при исходном наборе мониторинговых данных. Она демонстрирует наилучший баланс между полнотой обнаружения (Recall) и общей точностью (F1).

Для апробации на реальных данных опытного участка предложенную интеллектуальную модель интегрировали в информационно-аналитическую систему оперативного управления процессом производства алюминия [27]. Система может предупреждать о возможных нарушениях при превышении заданного порога вероятности. Сигнал передается дежурному оператору или технологу, который на основе текущих параметров работы электролизеров решает, нужны ли проверка и корректирующие воздействия.

Эффективность модели оценивается на апробационной выборке путем сопоставления прогнозов с фактами нарушений. Выборка содержит 962 суточные записи, из которых 946 относятся к нормальному состоянию технологического процесса, а 16 — к предаварийному, сформированному для шести зарегистрированных событий обнаружения конуса. Результаты оценки представлены в матрице ошибок (рис. 4), содержащей возможные комбинации предсказанных и реальных значений.

	0	1		0	1
0 (норма)	TN истинно отрицательное решение	FP ложно- положительное решение (ошибка I рода)	0 (норма)	900	46
1 (конус)	FN ложно- отрицательное решение (ошибка II рода)	TP истинно положительное решение	1 (конус)	6	10

Рис. 4. Матрица ошибок по данным апробации модели прогнозирования технологических нарушений типа «конус»

Класс 0 обозначает отсутствие нарушения, класс 1 — наличие нарушения. При совпадении прогнозируемого и фактического классов результат классификации считается истинным, а при несовпадении — ложным. Таким образом, матрица ошибок отображает результаты:

- истинно отрицательный (TN) — нет нарушения, прогноз совпадает с реальностью;
- истинно положительный (TP) — есть нарушение, прогноз совпадает с реальностью;
- ложноположительный (FP) — модель предсказала наличие нарушения, а в реальности его нет (ошибка первого рода);
- ложноотрицательный (FN) — модель предсказала отсутствие нарушения, а в реальности оно есть (ошибка второго рода).

Применительно к модели прогнозирования результат считается положительным при пороге вероятности 0,4. Он установлен по результатам анализа качества классификации и рассматривается как компромисс между полнотой выявления нарушений и допустимым числом ложных предупреждений (таблица 6).

Таблица 6

Оценка качества модели при различных порогах вероятности

Метрика качества	Порог вероятности								
	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9
F1	0,55	0,65	0,72	0,78	0,63	0,58	0,52	0,48	0,46

Исходя из значений матрицы ошибок, сформированной по результатам апробации модели, следует, что в категории событий без нарушений (верхняя строка матрицы) предложенная модель корректно классифицировала состояние «норма» в 95 % случаев (900 наблюдений), тогда как в 5 % случаев (46 наблюдений) было ошибочно определено состояние «нарушение». В категории событий с нарушениями (нижняя строка матрицы) доля верно распознанных состояний составила 62,5 % (10 наблюдений), а в 37,5 % случаев (6 наблюдений) нарушения остались незамеченными.

В таблице 7 показаны прогнозы по отдельным событиям при апробации. Результаты прогнозирования рассматривались в период предаварийного состояния — трехдневный интервал, предшествующий дню обнаружения (регистрации) конуса. Из-за близости событий на одном и том же электролизере для события 04.08.2025 учитывается только один день предаварийного состояния.

Таблица 7

Результаты прогнозирования конуса в апробационный период

№ п/п	№ электролизера	Дата обнаружения конуса	Дата предаварийного состояния	Результат прогнозирования	
				вероятность	класс
1	7	27.07.2025	24.07.2025	0,27	0
			25.07.2025	0,62	1
			26.07.2025	0,74	1
2	6	02.08.2025	01.08.2025	0,56	1
			31.07.2025	0,68	1
			30.07.2025	0,82	1
3	6	04.08.2025	03.08.2025	0,74	1
4	8	11.08.2025	08.08.2025	0,31	0
			09.08.2025	0,57	1
			10.08.2025	0,76	1
5	5	31.08.2025	28.08.2025	0,25	0
			29.08.2025	0,65	1
			30.08.2025	0,72	1
6	5	12.09.2025	09.09.2025	0,18	0
			10.09.2025	0,26	0
			11.09.2025	0,30	0

Итак, при апробации оптимальной для прогнозирования модели LightGBM зарегистрировано шесть событий обнаружения конуса. Модель выявила признаки развития нарушения для пяти событий, что составляет 83,3 %. Время упреждения для выявленных нарушений — от суток до трех. В одном случае предупреждение формировалось за трое суток до регистрации нарушения, в трех случаях — за двое суток и в одном случае — за сутки. Горизонт упреждения определялся как максимальное число суток между первым положительным прогнозом и датой регистрации конуса.

Обсуждение. Таким образом, результаты сопоставления прогнозных значений с зарегистрированными нарушениями на электролизерах опытного участка подтверждают способность модели выявлять технологические нарушения типа «конус» до момента их фактической регистрации с практическим горизонтом раннего прогнозирования 24–72 ч.

Полученные результаты согласуются с физико-технологическими особенностями возникновения нарушения типа «конус» [5]. От начала формирования дефекта до выраженного изменения режима работы электролизера может пройти несколько суток. Изменение ключевых параметров наблюдается на 2–3 день [22]. Поэтому применяемый в работе горизонт прогнозирования — от 24 до 72 ч следует признать технологически обоснованным интервалом, в пределах которого изменения контролируемых параметров могут быть предвестниками развития нарушения.

Кроме того, результаты апробации модели, как и в [16], подтвердили возможность прогнозирования нарушения за несколько суток до критического изменения состояния технологии. Однако есть и отличие. В [16] прогноз строился по индивидуальным токам анодов, а в представленной работе сопоставимое по горизонту предупреждение («за несколько дней до того, как конус становится очевидным») получено без использования специализированной системы измерения токов. Предложенное авторами решение может рассматриваться как дополнение к методам локального контроля анодов и состояния электролизеров на основе анализа параметров среднесуточного производственного мониторинга.

Результаты апробации отражают известные проблемы применения прогностических моделей в условиях промышленного электролиза, в том числе: сложность регистрации событий [17], дисбаланс классов, изменение статистических характеристик [15]. Снижение качества прогнозирования при переходе от тестовой выборки к промышленной проверке может быть связано еще и с изменчивостью реального технологического процесса и редкостью рассматриваемого типа нарушений. Так, доля наблюдений предаварийного состояния в апробационной выборке — менее 2 %, поэтому даже при высоком проценте правильно распознанных нормальных состояний относительно небольшое число ложноположительных решений существенно снижает прогностическую ценность модели.

Ложноположительные предупреждения отчасти объясняются человеческим фактором. Например, при признаках образования конуса технологи перемещают (поддерживают) аноды, проверяют и устраняют неполадки в точках подачи глинозема. Все это существенно меняет динамику параметров, предотвращает развитие нарушения и его фактическую регистрацию. В таких случаях модель выявляет признаки предаварийного состояния, однако событие не попадает в журнал регистрации нарушений, и предупреждение классифицируется как ложноположительное. Данная интерпретация требует отдельной проверки и сопоставления времени формирования предупреждений с записями о технологических операциях и последующей динамикой контролируемых параметров.

Ложноотрицательные результаты объясняются:

- отсутствием достаточно выраженных предвестников нарушения в среднесуточных параметрах;
- индивидуальными особенностями развития нарушения на отдельных электролизерах;
- корректностью производственной разметки нарушений, поскольку момент регистрации события не всегда совпадает с фактическим началом его развития.

Поэтому несмотря на использование временного разделения данных, необходима внешняя временная валидация модели.

На результаты апробации существенно влияет изменение условий ведения технологии. Со временем меняются управленческие настройки, состояние анодов, состав сырья, режимы анодного питания и регламенты обслуживания. Это значит, что признаки распределяются иначе, чем было при обучении модели. К тому же исследование выполнено на данных мониторинга небольшого числа электролизеров опытного участка, и для подтверждения обобщающей способности модели требуется дополнительная проверка на других участках производства и временных периодах.

В практическом плане полученные результаты открывают возможность применения интеллектуальной модели для раннего прогнозирования нарушений типа «конус» в реальных промышленных условиях. Благодаря этому образуется временной резерв для дополнительной проверки и выполнения превентивных технологических воздействий. Отметим, что для внедрения интеллектуальных средств недостаточно общей точности классификации. Серьезную роль играет баланс между чувствительностью модели и нагрузкой на технологический персонал при ложноположительных и ложноотрицательных решениях. Следует подчеркнуть важность журналирования предупреждений и значений вероятности, а также действий персонала и фактов подтверждения нарушений. Это позволит контролировать качество прогноза и уровень ложных срабатываний, уточнять порог активации модели и формировать репрезентативный набор подтвержденных случаев для дообучения.

Заключение. Предложена интеллектуальная модель для раннего прогнозирования технологических нарушений типа «конус» при производстве алюминия. В ходе исследования сформирован массив технологических данных по восьми электролизерам РА-550 за период 2020–2025 гг. Выполнена предварительная обработка мониторинговых данных, включающая очистку, восстановление пропусков, разметку и разделение данных на выборки с учетом временной структуры производственного процесса.

Для прогнозирования конуса применялись ансамблевые методы: градиентный бустинг (XGBoost, CatBoost, LightGBM), автоматизированный конвейер FEDOT и нейросетевые ансамбли (RTDL-RM, RTDL-NE, TabM). По результатам вычислительных экспериментов определены гиперпараметры моделей, обеспечивающие максимальные значения метрик оценки качества. Самой эффективной оказалась LightGBM с лучшими метриками Accuracy (0,88), Recall (0,79) и F1 (0,79).

Предложенную интеллектуальную модель интегрировали в информационно-аналитическую систему оперативного контроля производства алюминия и апробировали на данных реального технологического процесса. Сопоставление прогнозов с фактами нарушений показало, что при пороге чувствительности 0,4 модель корректно классифицировала состояние «норма» в 95 % случаев. Доля верно распознанных состояний «нарушение» — 63 %. Уровень ложноположительных срабатываний — 5 %, ложноотрицательных — 37,5 %. Ложные результаты возникают, в частности, из-за действий персонала для предотвращения развития нарушения до его официальной регистрации. Другие причины: некорректная производственная разметка нарушений, изменение условий технологии и ограниченность выборки.

Исследование позволило установить, что модель может выявить технологические нарушения за 24–72 ч до их фактической регистрации.

Результаты апробации и экспертная оценка технологов подтверждают достаточную эффективность и применимость предложенной модели в реальных условиях эксплуатации.

В перспективных исследованиях предполагается расширение обучающей выборки, проверка модели для других участков производства алюминия, а также комплексный анализ параметров среднесуточного и мгновенного мониторинга для определения места возникновения нарушения.

Список литературы / References

1. Сизяков В.М., Поляков П.В., Бажин В.Ю. Современные тенденции и стратегические задачи в области производства алюминия и его сплавов в России. *Цветные металлы*. 2022;7:16–23. URL: <https://www.rudmet.ru/journal/2131/article/35492> (дата обращения: 04.08.2026).
2. Sizyakov VM, Polyakov PV, Bazhin VYu. Current Trends and Strategic Objectives in the Production of Aluminum and Its Alloys in Russia. *Non-ferrous Metals*. 2022;7:16–23. (In Russ.) <https://www.rudmet.ru/journal/2131/article/35492> (accessed: 04.08.2026).
3. Heli Liu, Dhawan Saksham, Merrill Shen, Kangan Chen, Vincent Wu, Liliang Wang. Industry 4.0 in Metal Forming Industry Towards Automotive Applications: A Review. *International Journal of Automotive Manufacturing and Materials*. 2022;1(1):16–27. URL: <https://www.sciltp.com/journals/ijamm/articles/2504000083> (accessed: 04.08.2026).
4. Bochkaryov PYu, Korolev RD, Bokova LG. Comprehensive Assessment of the Manufacturability of Products. *Advanced Engineering Research (Rostov-on-Don)*. 2023;23(2):155–168. <https://doi.org/10.23947/2687-1653-2023-23-2-155-168>
5. Sadler B. Critical Issues in Anode Production and Quality to Avoid Anode Performance Problems. *Journal of Siberian Federal University. Engineering & Technologies*. 2015;8(5):546–568. <https://doi.org/0.17516/1999-494X-2015-8-5-546-568>
6. Михалев Ю.Г., Поляков П.В., Ясинский А.А., Поляков А.А. Возникновение конусов на аноде алюминиевого электролизера *Цветные металлы*. 2018;9:43–48. <https://doi.org/10.17580/tsm.2018.09.06>
7. Mikhalev YG, Polyakov PV, Yasinskiy AS, Polyakov AA. Spikes Generation on Anode of Aluminium Reduction Cell. *Non-ferrous metals*. 2018;9:43–48. <https://doi.org/10.17580/tsm.2018.09.06>
8. Polyakov PV, Vlasov AA, Mikhalev YuG, Yanov VV. On Cone Formation on Burnt Anode Face in Aluminum Electrolyzers. *Metallurgist*. 2017;60(9/10):1087–1093. <https://doi.org/10.1007/s11015-017-0411-2>
9. Penkova T, Senashova M, Korobko A. Multidimensional Analysis of Aluminum Production Monitoring Data in Basic Operation Modes. *CEUR Workshop Proceedings*. 2020;2727:128–136. URL: <https://ceur-ws.org/Vol-2727/paper17.pdf> (accessed: 04.08.2026).
10. Белоусова Н.В., Шарыпов Н.А., Шахрай С.Г., Безруких А.И. Угольная пена в алюминиевом электролизере: проблемы и некоторые пути их решения. *Цветные металлы*. 2017;8:43–49. <https://doi.org/10.17580/tsm.2017.08.06>
11. Belousova NV, Sharypov NA, Shakhrai SG, Bezrukikh AI. Coal Foam in an Aluminum Electrolyzer: Problems and Some Solutions. *Non-ferrous Metals*. 2017;8:43–49. <https://doi.org/10.17580/tsm.2017.08.06>
12. Metus A, Penkova T. Analysis of Aluminium Electrolysis Data in the Context of Extreme Values of Technological Parameters. *CEUR Workshop Proceedings*. 2020;2727:92–98. URL: <https://ceur-ws.org/Vol-2727/paper12.pdf> (accessed: 04.08.2026).
13. Zhi-Hua Zhou. *Machine Learning*. Singapore: Springer; 2021. 460 p. URL: <https://link.springer.com/content/pdf/bfm:978-981-15-1967-3/1?pdf=chapter+toc> (accessed: 15.07.2026).
14. Tugashova LG, Zatonitskiy 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>
15. Cheng Ji, Wei Sun. A Review on Data-Driven Process Monitoring Methods: Characterization and Mining of Industrial Data. *Processes*. 2022;10(2):335. <https://doi.org/10.3390/pr10020335>
16. Muntin AV, Zhikharev PYu, Ziniagin AG, Brayko DA. Artificial Intelligence and Machine Learning in Metallurgy. Part 1. Methods and Algorithms. *Metallurgist*. 2023;67(5/6):886–894. <https://doi.org/10.1007/s11015-023-01576-3>
17. Zhikharev PYu, Muntin AV, Brayko DA, Kryuchkova MO. Artificial Intelligence and Machine Learning In Metallurgy. Part 2. Application Examples. *Metallurgist*. 2024;67:1545–1560. <https://doi.org/10.1007/s11015-024-01648-y>
18. Abd Majid NA, Taylor MP, Chen JJ, Young BR. Aluminium Process Fault Detection and Diagnosis. *Advances in Materials Science and Engineering*. 2015;2015:1–11. <https://doi.org/10.1155/2015/682786>
19. Martel A. Spike Detection Using Advanced Analytics and Data Analysis. In book: Martin O. (ed) *Light Metals 2018*. Cham: Springer; 2018. P. 485–490. https://doi.org/10.1007/978-3-319-72284-9_64
20. Faraj M, Sayed K, Al Hosani A, Bakuteev A, Shyamala M, Pervez K, et al. Anode Spike Model – A Case Study of Challenges and Future Directions. In: *TRAVAUX 53. Proc. 42nd International ICSOBA Conference*. Lyon: ICSOBA;

2024. P. 1553–1573. URL: <https://icsoba.org/proceedings/42nd-conference-and-exhibition-icsoba-2024/?doc=131> (accessed: 04.08.2026).

18. Gang Yan, Ximing Liang. Predictive Models of Aluminum Reduction Cell Based on LS-SVM. In: *International Conference on Digital Manufacturing & Automation*. New York City: IEEE; 2010. P. 99–102. <https://doi.org/10.1109/ICDMA.2010.12>

19. Mikhalev A, Lugovaya N, Penkova T, Puzanov I, Zavadyak A. Application of Ensemble Algorithms to Detect Anode Effects in Aluminum Production. *CEUR Workshop Proceedings*. 2021;3047:79–85. URL: <https://ceur-ws.org/Vol-3047/paper11.pdf> (accessed: 04.08.2026).

20. Nazatul Aini Abd Majid, Mark P Taylor, John JJ Chen, Marco A Stam, Albert Mulder, Brent R Young. Aluminium Process Fault Detection by Multiway Principal Component Analysis. *Control Engineering Practice*. 2011;19(4):367–379. <https://doi.org/10.1016/j.conengprac.2010.12.005>

21. Puzanov II, Zavadyak AV, Klykov VA, Makeev AV, Plotnikov VN. Continuous Monitoring of Information on Anode Current Distribution as Means of Improving the Process of Controlling and Forecasting Process Disturbances. *Journal of Siberian Federal University. Engineering & Technologies*. 2016;9(6):788–801. <https://doi.org/10.17516/1999-494X-2016-9-6-788-801>

22. Поляков П.В., Шарыпова Н.А., Осипова В.А., Пьяных А.А. Математическое моделирование распределения тока при наличии нарушений на подошве анода алюминиевого электролизера. *Цветные металлы*. 2019;913(1):25–30. <https://doi.org/10.17580/tsm.2019.01.04>

Polyakov PV, Sharypova NA, Osipova VA, Panykh AA. Mathematical Modeling of Current Distribution in the Presence of Abnormalities on the Reduction Cell Anode Bottom. *Non-ferrous Metals*. 2019;913(1):25–30. <https://doi.org/10.17580/tsm.2019.01.04>

23. Van Buuren S, Groothuis-Oudshoorn K. mice: Multivariate Imputation by Chained Equations in R. *Journal of Statistical Software*. 2011;45(3):1–67. <https://doi.org/10.18637/jss.v045.i03>

24. Bentéjac C, Csörgő A, Martínez-Muñoz G. A Comparative Analysis of Gradient Boosting Algorithms. *Artificial Intelligence Review*. 2021;54(3):1937–1967. <https://doi.org/10.1007/s10462-020-09896-5>

25. Fort S, Huiyi Hu, Lakshminarayanan B. Deep Ensembles: A Loss Landscape Perspective. *ArXiv preprint*. 2019;2. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1912.02757>

26. Hossin M, Sulaiman MN. A Review on Evaluation Metrics for Data Classification Evaluations. *International Journal of Data Mining & Knowledge Management Process*. 2015;5(2):1–11. <https://doi.org/10.5121/ijdkp.2015.5201>

27. Завадяк А.В., Ноженкова Л.Ф., Пузанов И.И., Пенькова Т.Г., Коробко А.А., Коробко А.В. и др. *Инструменты интеллектуальной поддержки управления процессом обнаружения технологических нарушений и оценки технологического состояния комплекса производства алюминия*. Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ № 2021662399. Российская Федерация. Государственная регистрация в Реестре программ для ЭВМ — 27.07.2021. 1 с.

Zavadyak AV, Nozhenkova LF, Puzanov II, Penkova TG, Korobko AA, Korobko AV, et al. *Intelligent Support Tools for Managing the Detection of Process Disturbances and Assessing the Process State of an Aluminum Production Complex*. Certificate of Software State Registration No. 2021662399, 2021. 1 p. (In Russ.)

Об авторах:

Антон Сергеевич Михалев, программист 1-й категории, Институт вычислительного моделирования Сибирского отделения Российской академии наук (660036, Российская Федерация, г. Красноярск, ул. Академгородок, 50/44), [SPIN-код](#), [ORCID](#), [ScopusID](#), [ResearcherID](#), [ResearchGate](#), asmikhalev@yandex.ru

Татьяна Геннадьевна Пенькова, кандидат технических наук, доцент, заведующий отделом «Прикладная информатика», старший научный сотрудник, Институт вычислительного моделирования Сибирского отделения Российской академии наук (660036, Российская Федерация, г. Красноярск, ул. Академгородок, 50/44), [SPIN-код](#), [ORCID](#), [ScopusID](#), [ResearcherID](#), [ResearchGate](#), penkova_tg@icm.krasn.ru

Людмила Федоровна Ноженкова, доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник Института вычислительного моделирования Сибирского отделения Российской академии наук (660036, Российская Федерация, г. Красноярск, ул. Академгородок, 50/44), [SPIN-код](#), [ORCID](#), [ScopusID](#), [ResearcherID](#), expert@icm.krasn.ru

Заявленный вклад авторов:

А.С. Михалев: формальный анализ, разработка программного обеспечения, валидация результатов.

Т.Г. Пенькова: проведение исследования, разработка методологии, написание черновика рукописи.

Л.Ф. Ноженкова: разработка концепции, научное руководство.

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Декларация ИИ: авторы заявляют, что при подготовке текста рукописи не использовались технологии генеративного искусственного интеллекта (ИИ), ИИ не является соавтором публикации: авторство присвоено только физическим лицам, внёсшим существенный интеллектуальный вклад в исследование.

About the Authors:

Anton S. Mikhalev, First-category Programmer, Institute of Computational Modeling SB RAS (50/44, Akademgorodok, Krasnoyarsk, 660036, Russian Federation), [SPIN-code](#), [ORCID](#), [ScopusID](#), [ResearcherID](#), [ResearchGate](#), asmikhalev@yandex.ru

Tatiana G. Penkova, Cand.Sci. (Eng.), Associate Professor, Head of the Applied Informatics Department, Senior Research Fellow, Institute of Computational Modeling SB RAS (50/44, Akademgorodok, Krasnoyarsk, 660036, Russian Federation), [SPIN-code](#), [ORCID](#), [ScopusID](#), [ResearcherID](#), [ResearchGate](#), penkova_tg@icm.krasn.ru

Ludmila F. Nozhenkova, Dr.Sci. (Eng.), Professor, Chief Research Fellow, Institute of Computational Modeling SB RAS (50/44, Akademgorodok, Krasnoyarsk, 660036, Russian Federation), [SPIN-code](#), [ORCID](#), [ScopusID](#), [ResearcherID](#), expert@icm.krasn.ru

Claimed Contributorship:

AS Mikhalev: formal analysis, software, validation.

TG Penkova: investigation, methodology, writing – original draft preparation.

LF Nozhenkova: conceptualization, supervision.

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

All authors have read and approved the final manuscript.

AI Declaration: the authors declare that generative artificial intelligence (AI) technologies were not used in the preparation of the manuscript and that AI is not a co-author of the publication: authorship is assigned only to natural persons who have made a substantial intellectual contribution to the research.

Поступила в редакцию / Received 25.05.2026

Поступила после рецензирования / Reviewed 30.06.2026

Принята к публикации / Accepted 16.07.2026